



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**PODPŮRNÉ STRUKTURY PRO 3D TISK Z
KOVOVÝCH MATERIÁLŮ**

SUPPORT STRUCTURES FOR 3D PRINTING FROM METALLIC MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Hruboš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **David Hruboš**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Daniel Koutný, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Podpůrné struktury pro 3D tisk z kovových materiálů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je návrh a experimentální ověření nových typů podpůrných struktur pro technologii SLM. Struktury musí mít dostatečnou pevnost pro fixaci dílu a minimální objem.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Materiál a metody
5. Výsledky
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, laboratorní protokol, digitální data

Typ práce: experimentální

Účel práce: výzkum a vývoj

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Zásady pro vypracování práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2016.pdf

Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam literatury:

Caligano, F. (2014): Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting. *Materials & Design*, vol. 64, pp. 203-213, DOI:10.1016/j.matdes.2014.07.043

Hussein, A., Hao, L., Yan, C., Everson, R. & Young, P. (2013): Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, no. 7, pp. 1019-1026.

Strano, G., Hao, L., Everson, R.M. & Evans, K.E. (2013): A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 66, no. 9-12, pp. 1247-1254.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický,
Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá aditivní technologií selective laser melting, která umožňuje výrobu 3D objektů z kovových prášků. U toho procesu jsou většinou vyžadovány podpůrné struktury, které odvádějí z vyráběné oblasti teplo a ukotvují součást k základní desce. V práci byly navrženy čtyři nové typy podpůrných struktur. Byla otestována jejich funkčnost a poté byly ve zkoušce tahem porovnány mechanické vlastnosti navržených struktur.

KLÍČOVÁ SLOVA

Selective laser melting, podpůrné struktury, deformace

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with additive technology selective laser melting, which allows creating 3D objects from metal powder. The support structures are required in this process to dissipate process heat and anchor the part to the base plate. Four new types of support structures were designed in this work. The functionality of the structures was verified and mechanical properties of structures were compared in a strength test.

KEY WORDS

Selective laser melting, support structures, distortion

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HRUBOŠ, D. *Podpůrné struktury pro 3D tisk z kovových materiálů*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 51s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Danielu Koutnému, Ph.D. za poskytnuté rady a připomínky při zpracování práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Radku Vránovi za pomoc při výrobě vzorků, Ing. Petru Vosynkovi, Ph.D. a doc. Ing. Tomáši Návratovi, Ph.D. za otestování vzorků a rodině za trpělivost a podporu.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Podpůrné struktury pro 3D tisk z kovových materiálů* vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Daniela Koutného Ph.D. Současně prohlašuji, že jsem v seznamu uvedl všechny použité literární zdroje.

V Brně dne 20. května 2016

.....
Podpis autora

OBSAH

1. ÚVOD	10
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	11
2.1 Selective laser melting	11
2.1.1 Princip	11
2.1.2 Využití	12
2.2 Problémy SLM	13
2.2.1 Deformace a pnutí	13
2.2.2 Nedokonalosti povrchů	15
2.3 Minimalizace podpůrných struktur	17
2.3.1 Orientace součástí při výrobě	17
2.3.2 Povrchy nepotřebující podpory	18
2.3.3 Skenování laseru	19
2.4 Podpůrné struktury	21
2.4.1 Buněčné struktury	22
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	26
4. MATERIÁL A METODY	27
4.1 Návrh struktur	27
4.1.1 Struktura 1	27
4.1.2 Struktura 2	28
4.1.3 Struktura 3	29
4.1.4 Struktura 4	30
4.1.5 Struktura srovnávací	31
4.2 Testování struktur	32
4.2.1 Test 1	32
4.2.2 Test 2	33
5. VÝSLEDKY	36
5.1 Výsledky testu 1	36
5.2 Výsledky testu 2	39
5.2.1 Pevnost struktur	39
5.2.2 Porušení struktur	40
5.2.3 Napětí ve strukturách	42
5.2.4 Tuhost struktur	43
6. DISKUZE	44
7. ZÁVĚR	45
8. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	46
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	49
SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	50
SEZNAM TABULEK	51

1. ÚVOD

Selective laser melting je aditivní technologie umožňující přímou výrobu 3D objektu z kovového prášku. Technologie pracuje tak, že jsou postupně nanášeny vrstvy prášku, který je v požadovaných místech roztaven pomocí laseru a poté tuhne jako plný kus materiálu. Po dokončení výroby je součást zbavena nevyužitého prášku, který je uschován pro další použití.

Při výrobě převislých částí jsou vyráběné oblasti zespod podporovány pouze kovovým práškem. Po prudkém zahřátí laserem a následném ztuhnutí vzniká v materiálu pnutí a součást má tendenci deformovat se. Prášek také nemá takovou schopnost vedení tepla jako objemová součást, proto se v těchto oblastech kumuluje příliš energie, oblast roztaveného kovu se nežádane zvětšuje a dochází k nalepování okolních částic prášku na součást. K eliminaci těchto jevů jsou používány podpůrné struktury, které odvádějí z vyráběné oblasti teplo a současně ukotvují součást k základní desce, čímž minimalizují deformaci výrobku. Podpůrné struktury však musí být po dokončení výroby odstraněny a představují tak plýtvání materiálem i energií na jejich výrobu. Možností, jak zefektivnit proces, je nalezení vhodné orientace objektu na základní desce tak, aby podpůrných struktur bylo potřeba co nejméně. Poté je třeba zvolit podpůrné struktury, jež budou dostatečně odvádět teplo, bezpečně udrží součást v požadované poloze, ale zároveň pro jejich výrobu bude spotřebováno minimum materiálu. [1,2]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2

2.1 Selective laser melting

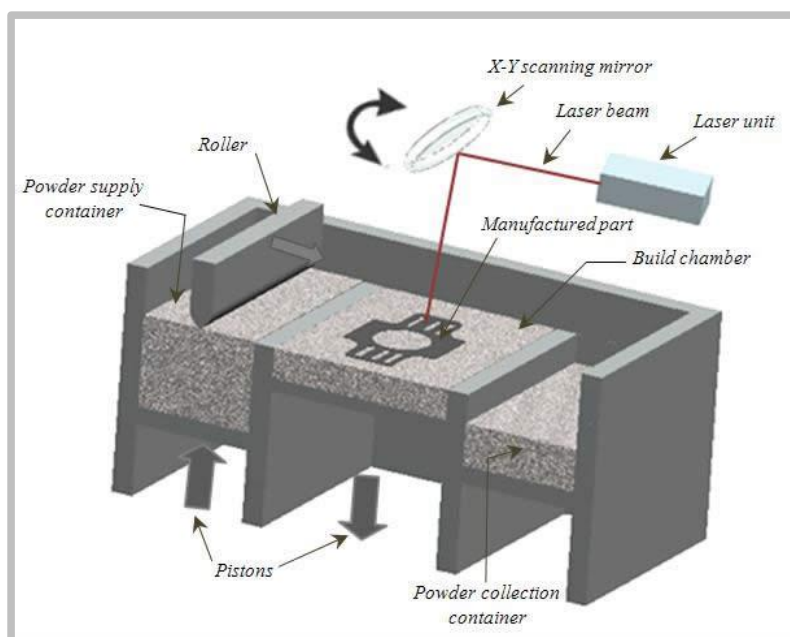
2.1

Selective laser melting (SLM) je technologie patřící do oblasti Additive Manufacturing, která umožňuje přímou výrobu trojrozměrných kovových součástí vrstvu po vrstvě. Pomocí laseru, který taví kovový prášek, jsou vytvářeny součásti složitých tvarů, jakých by běžnými výrobními procesy nebylo možné dosáhnout, případně by to bylo neúměrně nákladné. Zároveň tyto produkty mají srovnatelné, anebo dokonce lepší mechanické vlastnosti než výrobky získané konvenčními metodami. [1;2]

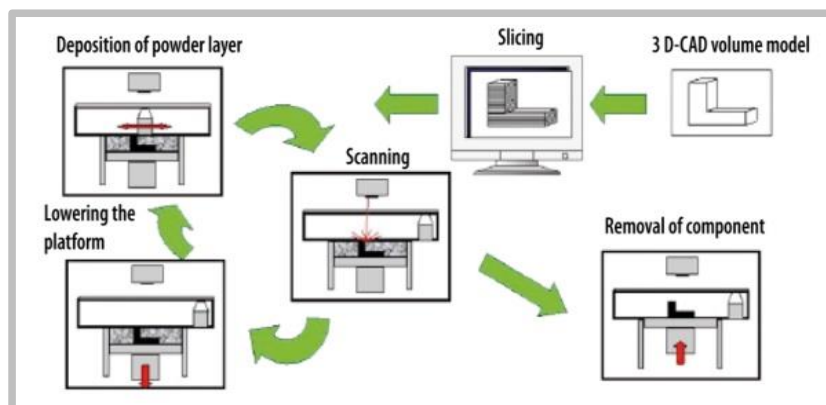
2.1.1 Princip

2.1.1

Technologie pracuje na základě 3D CAD modelu. Ten je nejprve rozložen na tenké vrstvy a pro každou vrstvu je vygenerována dráha laseru. Takto připravená data jsou převedena do SLM zařízení, kde jsou zvoleny parametry procesu, jako jsou výkon a rychlost skenování laseru. Vrstva prášku, o stejné tloušťce jako mají jednotlivé vrstvy rozloženého modelu, je nanášena na pracovní desku. Paprsek laseru se pohybuje po geometrii dané vrstvy CAD modelu a v místech, která laser skenuje, vzniká takzvaný „melting pool“, tedy roztavený kov. Jednotlivá zrnka kovového prášku se tak spojí a tuhnou jako jeden kus kovu. Poté, co laser vytvoří jednu vrstvu objektu, je pracovní deska snížena právě o tloušťku jedné vrstvy a je na ni znovu rozprostřen prášek. Takto se celý proces opakuje, dokud není díl hotov. [3]



Obr. 1 Princip SLM [4]



Obr. 2 Proces SLM [3]

Jelikož laser dokáže dokonale roztavit vrstvu naneseného prášku, jsou vyráběny součásti s hustotou téměř 100 %. [5] To spolu s jemnozrnnou strukturou, vzniklou díky rychlému tuhnutí kovu, zajišťuje mechanické vlastnosti na úrovni konvenční výroby nebo i lepší. Celý proces probíhá v inertní atmosféře buď N₂ nebo Ar, čímž se předchází oxidaci kovů. Poté co hotový díl zchladne, je odstraněn přebytečný prášek a provádí se dokončující operace. [3;6]

2.1.2 Využití

SLM slouží jak k výrobě prototypů, tak i k výrobě finálních produktů. Značné geometrické volnosti produktů SLM se využívá například při výrobě forem nebo nástrojů, protože je možné jednoduše vytvářet chladicí kanálky, což výrazně zvyšuje kvalitu nástrojů. Výrobky se vyskytují také ve zdravotnictví, kde je potřeba pro každého pacienta vytvořit originální tvar pro jeho tělo, například u kyčelních nebo zubních náhrad. [3] Velký potenciál má také výroba porézních buněčných struktur, které poskytují velmi dobrou kombinaci relativně vysoké pevnosti a nízké hmotnosti. U výrobků z těchto struktur je navíc možné např. zvětšit tloušťku stěn buněk (případně zvětšit průměry prutů) a zvýšit tak pevnost součásti pouze v oblastech, ve kterých je nejvíce namáhána. [7] Takové výrobky jsou žádány v automobilovém a leteckém průmyslu, nebo také ve zdravotnictví. [2]



Obr. 3 Kyčelní implantát vyroben pomocí SLM [8]

Dalším využitím SLM může být také výroba mechanismů, které nevyžadují následnou montáž. Tedy mechanismus se vyrobí jako již složený a při dokončovacích pracích se pouze odstraní přebytečný prášek ze spojů. Tímto způsobem můžeme vytvářet mechanismy, u kterých by po běžném vyrobení a složení musely být komponenty ještě nějakým způsobem spojovány (lepeny, svařovány). [9]



Obr. 4 Univerzální spoj vyroben pomocí SLM [9]

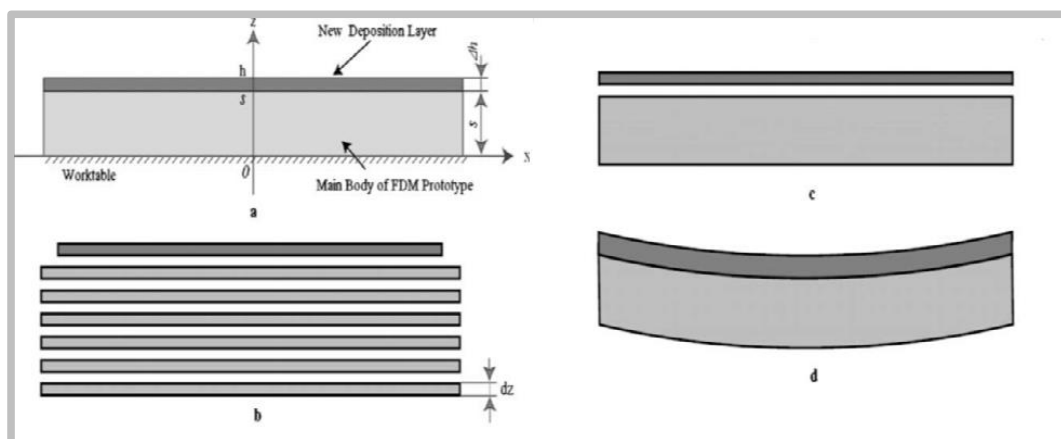
2.2 Problémy SLM

2.2

2.2.1 Deformace a pnutí

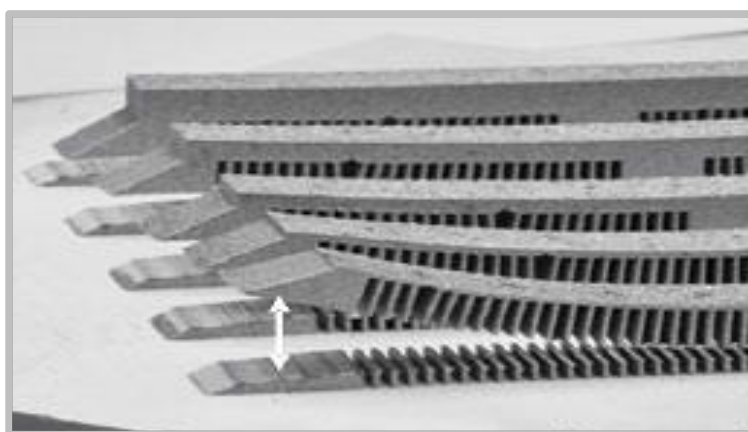
2.2.1

Při SLM procesu je kovový prášek lokálně nataven pohybujícím se laserem. Důsledkem nerovnoměrného prudkého zahřátí a rychlého ochlazení kovu je zbytkové tahové pnutí v součásti. [10] Natavená tenká vrstva má tendenci deformovat předchozí vrstvy nahoru, protože tavenina při ochlazování zmenšuje svůj objem. [1] Pokud by takto vzniklé pnutí způsobilo výraznější deformaci součásti, musela by být výroba zastavena, aby nedošlo ke kolizi zařízení a výrobku, nebo by výsledný tvar neodpovídal požadavkům. Proto je potřeba tomuto jevu předcházet. [10] Teoretickou možností je namodelovat součást s negativním úhlem a spoléhat na to, že vlivem pnutí se součást zdeformuje do požadovaného tvaru. To by bylo ovšem u skutečné součásti velmi složitě realizovatelné, a tak konečný tvar výrobku zpravidla závisí na ukotvení produktu k základní desce. [1] Toho je dosaženo za pomoci podpurných struktur, které současně zajišťují odvádění tepla z laserem ozářené oblasti a zabráňují výraznějším deformacím součásti. Podpurné struktury ovšem představují v konečném důsledku plýtvání, jak už energií na jejich výrobu, tak výrobním časem i časem na jejich následné mechanické odstranění. Odstraňování navíc může být problematické, protože struktury jsou vyrobeny ze stejného materiálu jako součást a mají tedy značnou pevnost. Odstraňování musí probíhat opatrně, aby nedošlo k poškození součásti, např. odlomení menších částí. [11] Struktury samozřejmě také zvětšují spotřebu materiálu. V rámci zefektivňování celého procesu je tedy důležité minimalizovat jejich objemy. To se projeví v ceně hlavně u velkoobjemových součástí. [1]



Obr. 5 Vznik deformace [12]

Metodou, jak zmenšit odchylky výrobku od požadované geometrie a minimalizovat vnitřní pnutí, je předehřev. *Bremen a kol.* [3] provedli studii, ve které zkoumali vliv předehřevu na zbytkové pnutí v součásti. Za různých teplot byly vyrobeny vzorky, které byly poté odděleny od podpurných struktur, a bylo pozorováno jejich následné vychylování od původního tvaru. Obrázek 6 ukazuje, jak se lišila deformace součásti v závislosti na teplotě předehřevu. Při teplotě předehřevu 200 °C byla odchylka tvaru součásti od 3D modelu téměř nulová a při teplotě 250 °C nebylo pozorováno žádné vychýlení z požadovaného tvaru, což ukazuje, že v součásti nebylo velké zbytkové pnutí. Kdežto u vzorku, který byl vyroben za pokojové teploty, vznikla po oddělení od podpurných struktur výrazná deformace. Předehřev tedy umožňuje redukci množství podpurných struktur, a tak i zkrácení výrobního času. Další výhodou je snížení rizika prasknutí v důsledku pnutí. [3]



Obr. 6 Vychylování součásti při různých teplotách předehřevu [3]

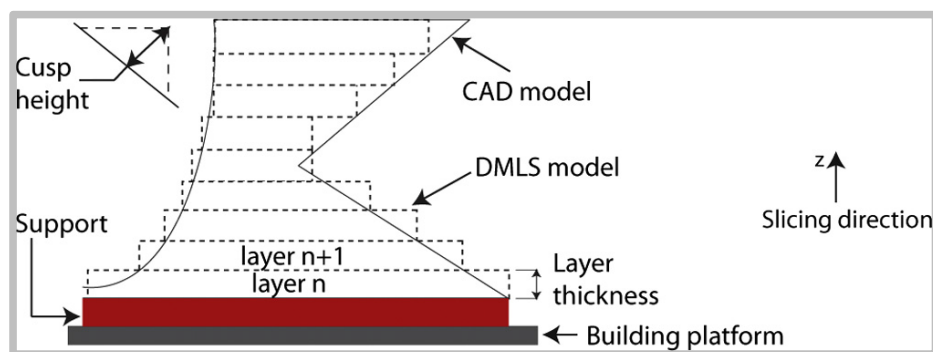
P.Vora a kol. [13] se ve své práci snažili vytvořit přepisluou část bez podpurných struktur. Hlavní myšlenkou bylo použití eutektického materiálu, který se taví při nižších teplotách než jednotlivé složky slitiny, při procesu tak materiál

prochází menšími teplotními změnami a vzniká menší zbytkové pnutí v součásti. Práškové částice Al a Si byly smíchány v takovém poměru, aby vytvořily eutektickou směs, ze které pak byly vyráběny součásti ve tvaru písmene *T*. Při zvolení teploty předehřevu 100 °C byly úspěšně vytvořeny 2 mm dlouhé převislé části. Při teplotě předehřevu 380 °C se podařilo vytvořit převislou část o velikosti 5 mm bez jakýchkoliv podpor. Tato část vykazovala výškovou výchylku 1 mm od požadovaného tvaru, ale předpokládá se, že tato výchylka může být dále redukována upravováním teploty předehřevu. [13] *D. Thomas* [14] provedl podobný test avšak za normálních podmínek. Přijatelně vyrobená převislá část byla ve studii pouze o velikosti 0,5 mm. Vzorky s převislými částmi většími než 1,5 mm se deformovaly tak, že nebyly vůbec dokončeny. [14]

2.2.2 Nedokonalosti povrchů

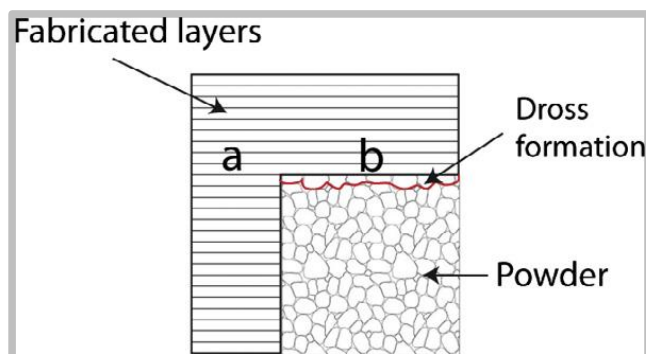
2.2.2

Jedním z nejběžnějších nedostatků SLM je takzvaný „staircase effect“. Vyskytuje se u všech metod additive manufacturing, tedy u metod, při kterých se produkt vytváří vrstvu po vrstvě. 3D CAD model, jenž obsahuje ve zvolené orientaci skloněné stěny (se základní rovinou nesvírají úhel 0° ani 90°, nebo jsou nějak zakřiveny), musí být v těchto oblastech aproximován tak, aby ho bylo možné vytvořit po jednotlivých vrstvách. Tím pádem povrch už není úplně hladký a zhoršuje se jeho kvalita. Tento jev se dá korigovat změnou úhlů stěn ve vyráběném objektu, což ale nemusí být vždy uskutečnitelné. Druhou možností je změna tloušťky vrstev, po kterých je součást vyráběna. S tenčími vrstvami je dosaženo hladšího povrchu, avšak za cenu nárůstu výrobního času, tedy i nákladů. [1;2]



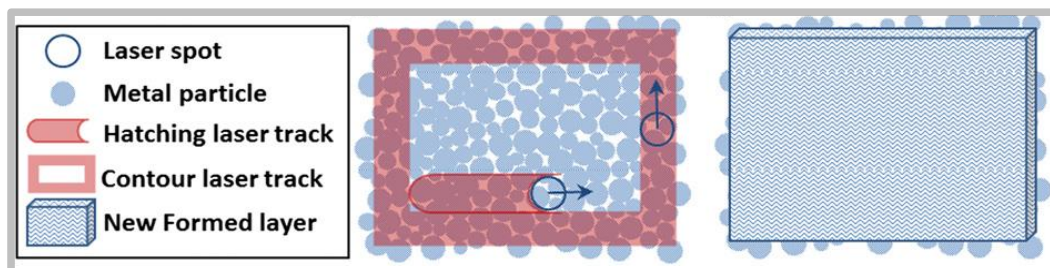
Obr. 7 Staircase effect [1]

Pokud je laserem ozářena oblast, pod kterou se nachází pevný materiál, je vedení tepla na vysoké úrovni. Oproti tomu pokud je ozářena část produktu, která je podporována pouze kovovým práškem, nedochází k takovému odvodu tepla ze součásti (odvádění tepla může být až stokrát menší). [15] Tím pádem je absorbovaná energie větší a oblast roztaveného kovu se rozšíří mimo zamýšlenou geometrii. Výsledný výrobek tak ztrácí rozměrovou přesnost i kvalitu povrchu. [1]

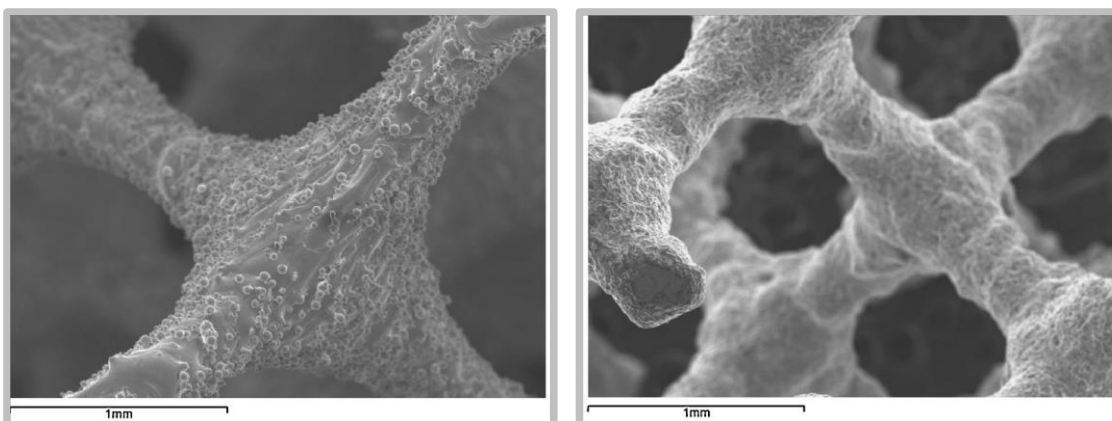


Obr. 8 Zhoršení rozměrové přesnosti převalené části [1]

C. Yan a kol. [2] vyrobili struktury a poté je zkoumali mikroskopem. Na povrch struktur bylo nalepeno mnoho částic prášku, které značně snižovaly jeho výslednou kvalitu. Tento jev může mít dvě příčiny. Zaprvé laser při vytváření kontur může natavit i část zrn, která už jsou větší částí mimo požadovanou geometrii a ta pak zůstávají přilepena na výrobku. Druhým vysvětlením je tepelná difuze. Jakmile laser roztaví prášek, vznikne velký teplotní rozdíl mezi roztaveným kovem a okolním práškem. V důsledku tohoto rozdílu pak probíhá tepelná výměna mezi pevným materiálem a volným práškem, která vede k přichycování částic prášku na součást. [2] Pro zmenšení drsnosti povrchu je možné použít prášek s menšími částicemi a následně například otryskat součást (avšak opatrně, aby nedošlo k poškození tenkých částí). [16] Ke zlepšení povrchu vede také tepelné zpracování, při kterém se přichycené částice spojí s celistvým materiálem. [17]



Obr. 9 Princip nalepování zrněk na tavenou oblast [16]



Obr. 10 Struktura po vyrobení (vlevo) a po tepelném zpracování (vpravo) [17]

2.3 Minimalizace podpůrných struktur

2.3

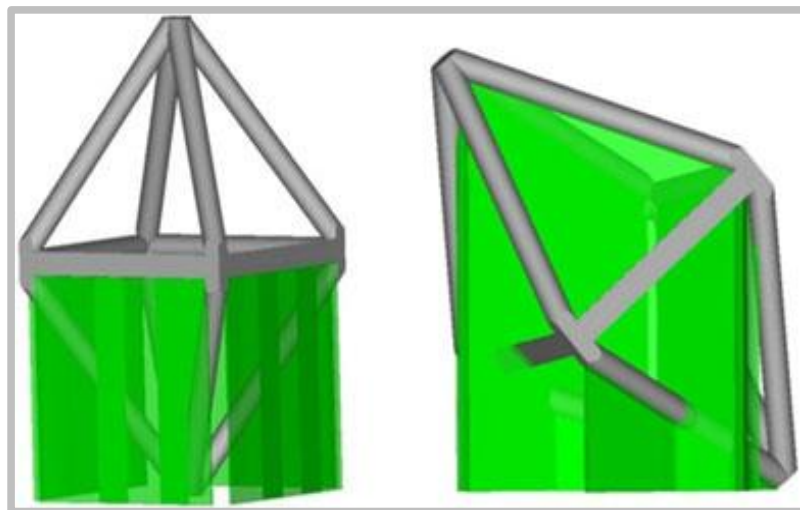
2.3.1 Orientace součásti při výrobě

2.3.1

Jednou z hlavních možností, jak minimalizovat počet podpůrných struktur a zefektivnit tak celý proces 3D tisku, je zvolení vhodné orientace objektu na pracovní desce. Ke zvolení správné orientace objektu je hlavní určení kritických oblastí, ve kterých jsou pro bezproblémovou výrobu potřeba podpůrné struktury. Obecně se nazývají „overhanging parts“, tedy převísle části, které pod sebou nemají pevný materiál. To znamená, že roztavený materiál je zespod podporován pouze kovovým práškem. Orientace objektu na pracovní desce je volena tak, aby těchto oblastí bylo co nejméně. Plochy, které jsou v kontaktu s podpůrnými strukturami, mají po odstranění struktur horší povrchy než zbytek součásti a zvětšují tedy požadavky na následné opracování. Při volení orientace by měl být zohledněn výrobní čas, i požadavky a čas potřebný na dokončovací práce. Pokud některé dvě orientace mají stejné nároky, je vybrána ta s níže položeným těžištěm, aby byla zajištěna vyšší stabilita vyráběné součásti při procesu. [7]

G.Strano a kol. [7] ukázali možnou strategii při hledání nejvhodnější orientace součásti na pracovní desce. V softwaru Matlab byl vytvořen program, do kterého se následně importovala součást ve formě STL. Uživatelem byla zvolena vzdálenost nejnižšího bodu součásti od pracovní desky a hraniční úhel sklonění, tedy nejmenší úhel mezi pracovní deskou a součástí, při kterém ještě nejsou potřeba podpůrné struktury. Pokud nějaká plocha svírala se základní deskou menší úhel než zvolený hraniční, byly pod ní vygenerovány podpůrné struktury. Poté byla součást rotována kolem os X a Y po kroku 5° (za předpokladu, že základní deska leží v rovině XY) a pro každou orientaci byl spočítán potřebný objem struktur. Poté, co software provedl výpočty pro všechna možná natočení, byla určena orientace, která vyžadovala nejmenší objem podpůrných struktur při zvolených parametrech. Popsaný postup byl aplikován na konkrétní geometrii. Hraniční úhel byl zvolen 35° a

vzdálenost nejnižšího bodu součásti od pracovní desky byla nastavena na 0 mm. Výsledky jsou zobrazeny na obrázku 11, kde zelená barva zobrazuje podpurné struktury. Nejvýhodnější orientace je ukázána vlevo a vpravo je zobrazena orientace, která by vyžadovala největší objem podpurných struktur. Spočítané objemy struktur byly $81,059 \text{ mm}^3$ a $172,723 \text{ mm}^3$, což jasně demonstruje důležitost správné orientace součásti na pracovní desce. [7]

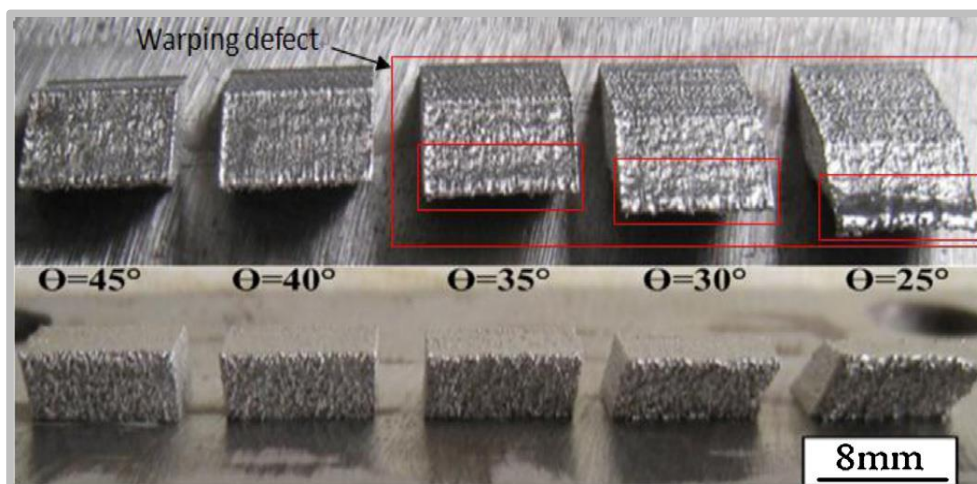


Obr. 11 Různé orientace součásti při výrobě[7]

2.3.2 Povrchy nepotřebující podpory

Převíslé části („overhanging parts“) jsou kritické oblasti součástí, které svírají se základní deskou příliš malé úhly a musí pod nimi být vystavěny podpurné struktury, jinak by došlo k jejich zhroucení nebo by jejich povrchy byly nevyhovující. Samonosný úhel představuje minimální úhel, pod jakým může být rovina nakloněná, aniž by potřebovala podporu. Se zvětšujícím se úhlem (od roviny XY) se zmenšuje nebezpečí zhroucení a také vliv „staircase effectu“. *F.Calignano* [1] ve své studii testovala skloněné plochy svírající s rovinou XY úhly 30° až 45° . Všechny plochy se podařilo vyrobit bez podpurných struktur, nicméně tyto plochy měly velkou drsnost povrchů. To bylo způsobeno velkou akumulací tepla v těchto oblastech, protože kovový prášek má v porovnání s celistvým materiálem nízkou tepelnou vodivost. A tak docházelo k nežádoucímu zvětšování tavné lázně i mimo navrhnutou geometrii a nalepování zrněk prášku na součást.[1]

D.Wang a kol.[6] se ve své studii snažili navrhnout buněčnou strukturu, která by byla bez problému vyrobena pomocí SLM. Proto byly vyrobeny stěny skloněné pod úhly 45° až 25° , na kterých bylo ukázáno, že stěny svírající se základní deskou úhel 35° a menší se při výrobě deformují vlivem vznikajícího pnutí. Navíc s klesajícím úhlem také klesá kvalita povrchu v důsledku přichycování částic prášku na součást. Z toho bylo usouzeno, že vzpěry ve strukturách by se základní deskou měly svírat úhly 40° a větší, jinak by mohlo dojít k odchylkám od zamýšleného tvaru. [6]



Obr. 12 Vyrobené vzorky s různými úhly sklonu stěn [6]

2.3.3 Skenování laseru

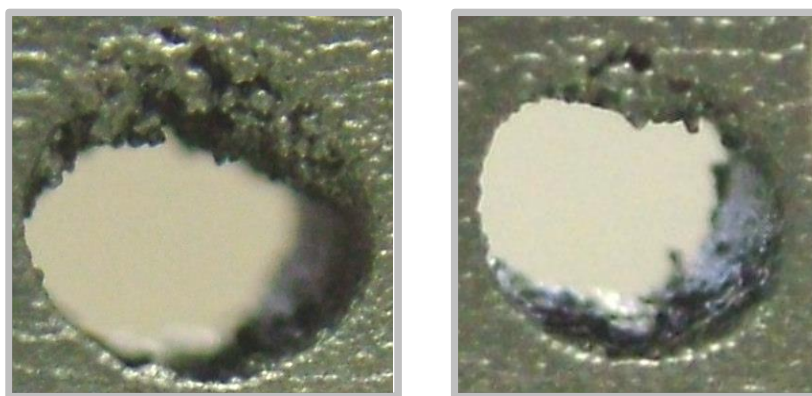
2.3.3

M. Cloots a kol. [18] se zabývali výrobou ploch svírajících se základní deskou malé úhly. Pro jejich výrobu byly použity různé strategie pohybu laseru (různé rychlosti laseru a vzdálenosti jednotlivých drah), se snahou zmenšit energii vstupující do součásti a vyrobit tak stěny svírající se základní deskou co nejmenší úhly, bez ztráty kvality povrchu. Při tomto testování se ukázalo, že největší vliv na kvalitu vyrobeného povrchu má směr pohybu laseru. Nejlepších povrchů bylo dosaženo, pokud směr pohybu laseru byl rovnoběžný s převislou hranou součásti. Při tomto směru pohybu pak byly také úspěšně vytvořeny plochy svírající se základní deskou úhel pouze 20°. [18]

Pohl a kol. [19] provedli studii, ve které se zabývali zbytkovým pnutím v součásti vyrobené pomocí laserového spékání metodou DMLS. Byly zkoumány výchylky tenkého plechu vzniklé vlivem zbytkového pnutí. Bylo ukázáno, že zmenšit vznikající pnutí je možné zvětšením vzdáleností mezi jednotlivými drahami laseru. To ovšem může zároveň snížit hustotu vyrobené součásti a negativně tak ovlivnit její mechanické vlastnosti.[19]

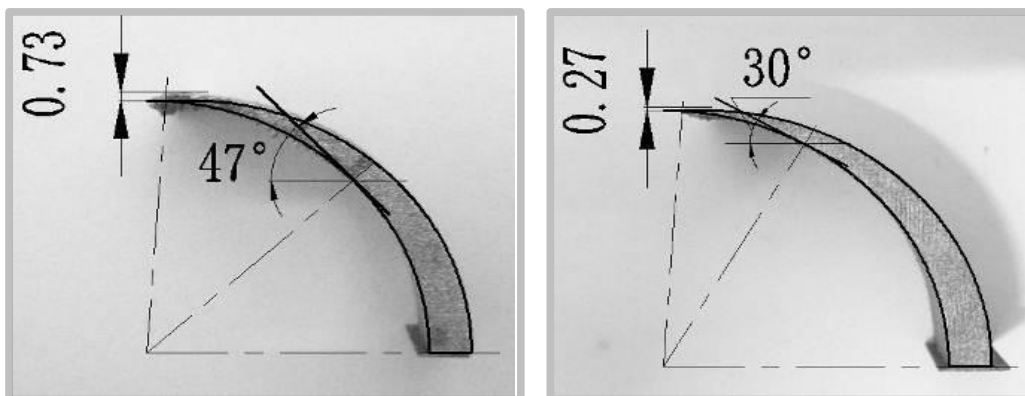
J.Jhabvala a kol. [20] ve své studii použili pro výrobu podpůrných struktur pulzní laser. Pokud není použit kontinuální laser, ale pulzní, roztaví se pouze povrch kovových zrn a spojení sousedních zrn tak vznikne za dodání menší energie. Použití pulzního laseru je také dobré pro přesnost výrobku, protože tavenina se nestihne rozšířit, ale poslouží pouze pro spojení zrn. Tímto způsobem vznikne pórovitý objekt, který má horší mechanické vlastnosti v porovnání s materiálem o hustotě 100 %. To je využito jako výhoda u podpůrných struktur. Nastavováním síly, rychlosti a frekvence laseru mohou být vytvořeny různé mikrostruktury. Ve studii je ukázáno, že správným nastavením parametrů laseru je možné vytvořit strukturu, která bude dostatečně pevná, aby vydržela pnutí vznikající v součásti během výroby, ale také dostatečně křehká, aby bylo možné ji po dokončení součásti odstranit pískováním. [20]

J.-P.Kruth a kol. [15] ve své studii provedli výrobu převislých částí s nekonstantním nastavením laseru. Pokud je převislá část vyráběna se stejným nastavením laseru jako zbytek součásti, melting pool se v převislé oblasti výrazně zvětší, protože odvod tepla kovovým práškem je výrazně menší než u pevného materiálu. Z toho pramení horší kvalita povrchů v těchto oblastech. Proto byla do zařízení nainstalována kamera a fotodioda, za jejichž pomoci byl roztavený kov monitorován a parametry laseru byly upravovány přímo během procesu, což vedlo ke zmenšení rozdílů objemu roztaveného kovu při výrobě jednotlivých částí. Tímto způsobem bylo dosaženo lepší kvality vyrobených povrchů v problematických oblastech. Na obrázku 13 je vlevo součást vyrobená s konstantním nastavením laseru a vpravo součást vyrobená s parametry laseru upravovanými během procesu. [15]



Obr. 13 Součásti vyrobeny s různými parametry laseru [15]

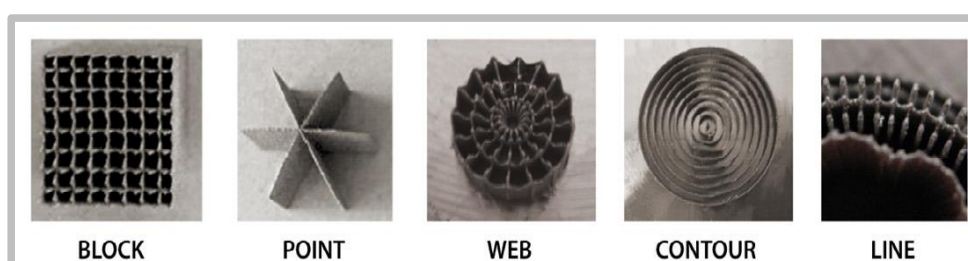
D. Wang a kol. [21] zkoumali, jak výkon laseru ovlivňuje kvalitu vyrobených převislých částí. Zakřivená testovací součást byla vyrobena při různých rychlostech skenování laseru a bylo pozorováno, při jakých úhlech sklonu tečny k zakřivené ploše vznikne zhoršený povrch. Bylo ukázáno, že s rostoucí rychlostí laseru může být vyrobena větší převislá část, protože energie vstupující do součásti není tak velká. Při rychlosti laseru 200 mm/s byl jako hraniční úhel stanoven 47° , kdežto při skenovací rychlosti 600 nebo 800 mm/s byl kvalitně vyroben povrch až po úhel sklonu 30° viz obrázek 14. [21]



Obr. 14 Převislá součást vyrobená různými rychlostmi laseru [21]

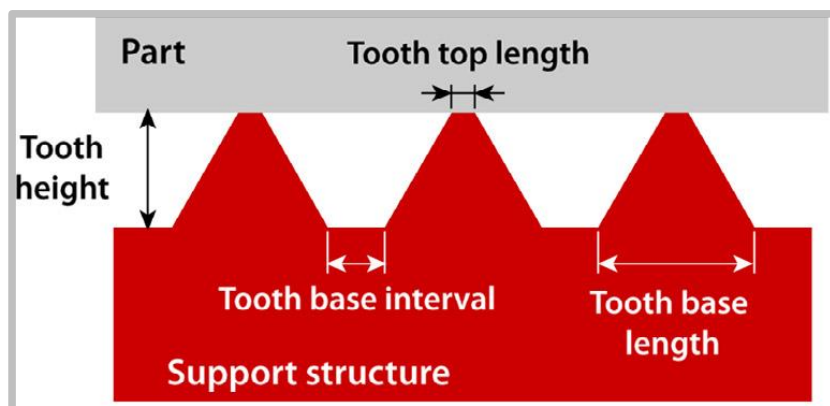
2.4 Podpůrné struktury

Pokud je vyráběna součást složitějšího tvaru, podpůrné struktury jsou většinou nezbytnou součástí úspěšné výstavby. Jejich hlavní úlohou je odvádět z vyráběné části teplo a minimalizovat deformace součásti. Pro větší objemy se nejčastěji používají podpůrné struktury s názvem block. Tyto struktury jsou tvořeny stěnami v navzájem kolmých směrech. Pro usnadnění odstraňování struktur se většinou přistupuje k tomu, že bloky nejsou celistvé v celém objemu, ale v určitých intervalech se v nich vytváří mezery tak, aby jejich odstraňování mohlo probíhat postupně krok po kroku. Pro malé prvky se pak používají pouze bodové podpory. [1] Tyto běžně používané podpůrné struktury jsou obsaženy v některých softwarech, které jsou schopny je sami vygenerovat tam, kde je to třeba. Často je však potřeba, aby je uživatel dále upravil na základě vlastní zkušenosti. [7]



Obr. 15 Běžně používané druhy podpůrných struktur [1]

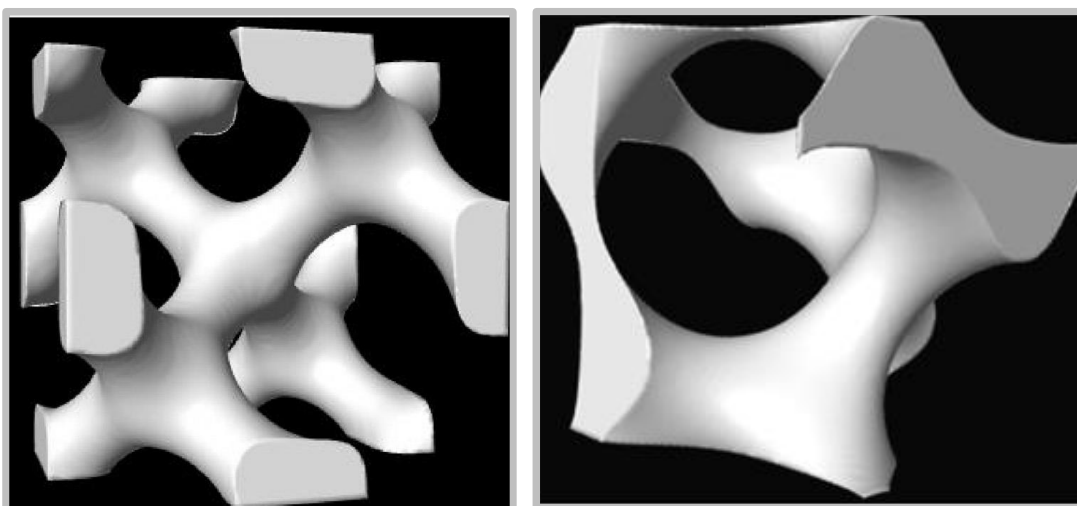
Hlavní část struktur může být připojena k samotnému výrobku pomocí takzvaných zubů. Toto připojení výrazně ulehčuje následné odstraňování struktur. [1] Ovšem malá styková plocha nemusí zajistit dostatečné vedení tepla, proto se může přistoupit k tomu, že jsou určeny spojovací vrstvy. To jsou první vrstvy součásti vytvářené na podpůrných strukturách, u kterých jsou upraveny parametry laseru tak, aby energie vstupující do materiálu nebyla příliš vysoká a byly vytvořeny přijatelné povrchy. Tyto vrstvy pak poskytují dostatečný odvod tepla pro standardně vyráběné vrstvy nad nimi. *M. Cloots a kol.* [18] provedli studii zabývající se korekcí energie laseru při výrobě prvních vrstev součásti na podpůrných strukturách. Podpůrné struktury byly k součásti připojeny pouze bodově, takže by při použití standardního nastavení laseru neposkytovaly dostatečný odvod tepla ze součásti. Ve studii bylo ukázáno, že největší vliv na kvalitu povrchu součásti, jenž je v kontaktu s podpůrnými strukturami, má vzdálenost bodů styku součásti a podpůrných struktur, kde s menší vzdáleností je dosaženo lepších povrchů. Bylo také ukázáno, že při úpravě parametrů laseru u prvních dvaceti vrstev, je možné použít podpory s minimálními bodovými připojeními k součásti, protože vstupující energie není tak velká a podpory dokáží vzniklé teplo odvádět tak, aby byly vytvořeny uspokojivé povrchy na součásti. Nejlepší povrch byl dosažen při takovém nastavení laseru, kdy hustota vyrobených spojovacích vrstev byla okolo 90 %. [18]



Obr. 16 Připojení podpůrných struktur k součásti pomocí zubů [1]

2.4.1 Buněčné struktury

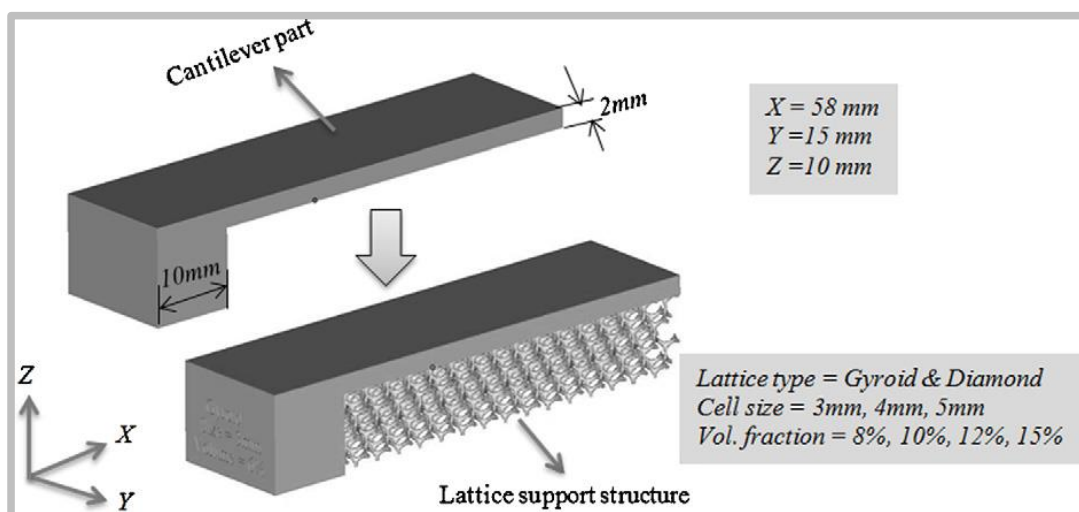
Buněčné kovové struktury vykazují dobrou kombinaci pevnosti, relativně nízké hmotnosti a dobré absorpce energie. Vznikají pravidelným opakováním buňky a díky svým vlastnostem jsou žádané v automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu, zdravotnictví, ale i jako podpůrné struktury při výrobě součástí pomocí SLM. Základním požadavkem na jakoukoliv strukturu je, aby byla samonosná a nebortila se během stavby. V případě mřížových struktur užívaných jako podpůrné, musí být samozřejmě dostatečně pevné, aby byly schopné zabránit větším deformacím součásti vlivem pnutí. [2;11]



Obr. 17 Struktura Schwarz diamond (vlevo) a Schoen gyroid (vpravo) [16;17]

U mřížových struktur se používá objemový zlomek, který udává poměr objemu materiálu k objemu buňky. Pokud by byl poměr materiálu příliš malý, hrozilo by, že se sousední vrstvy nespojí. Také by mohlo dojít k tomu, že daná struktura bude příliš křehká a nebude možné ji tedy použít. Nejnižší poměr materiálu, který je použitelný, se liší v závislosti na zvolené struktuře a také velikosti jedné buňky. Pokud by byl objemový zlomek naopak příliš velký, mohlo by dojít k tomu, že materiál zaplní vnitřní otvory a nebude tak dosaženo požadované geometrie. Je možné vyrobit struktury s poměrem materiálu pod 10 %, čímž je znatelně šetřena energie, materiál a také výrobní čas. [11]

A. Hussein a kol. [11] provedli studii buněčných struktur, ve které se zabývali buňkami typu Schoen gyroid a Schwarz diamond a vhodností jejich použití jako podpůrných struktur. Pro jejich zkoumání byla navržena součást s velkou převislou oblastí (viz obrázek 18). Jednotlivé struktury o velikosti buněk 3 mm, 4 mm a 5 mm a objemovým poměrem 8 %, 10 %, 12 % a 15 % byly testovány jako podpůrné struktury pro převislou oblast.



Obr. 18 Součást pro testování buněčných struktur[11]

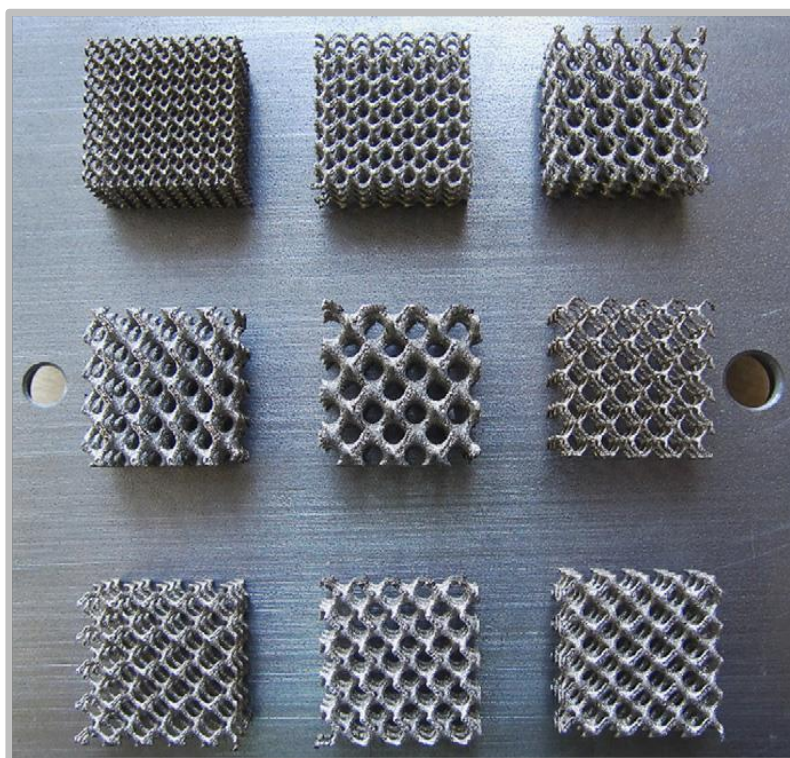
V prvním kroku bylo pozorováno, zda je vůbec možné buňky o jednotlivých parametrech postavit a využít je jako podpůrné struktury. Ukázalo se, že struktury s nízkým objemovým poměrem mohou být příliš křehké a výstavba některých vzorků selhala. Nejmenší možný objemový zlomek, se kterým bylo možné buňky vystavit, se lišil typem a velikostí buňky. Například buňky typu Schwarz diamond o objemu 10 % a velikosti buňky 4 mm a 5 mm, nebyly úspěšně vystaveny, protože při těchto parametrech vznikaly ve struktuře vzpěry o průměrech 0,28 mm, což byl příliš malý průměr pro výrobu pomocí SLM. [11] K tomuto problému může dojít už při výrobě struktury, ještě před tím než začne být namáhána převislou součástí. Pokud k tomuto dojde, výroba daných vzorků by měla být zastavena, aby nedošlo k větším škodám, jako třeba poškození ostatních součástí ve výrobní komoře, anebo samotného zařízení. Dalším důvodem, proč výstavba některých typů buněk selhala, byla příliš velké mezera mezi jednotlivými body připojení struktury k součásti. Například u struktury typu gyriod o velikosti buňky 5 mm a objemovém poměru 8 % vznikla mezi jednotlivými body připojení struktury k součásti mezera 3,8 mm, což

představuje velkou převislou část, která nemůže být postavena bez podpory. [11] Struktura tak nezabraňovala dostatečně deformaci součásti a výroba musela být přerušena. V rámci šetření energií i materiálu je logickou snahou používat podpůrné struktury o nízkých objemových poměrech, avšak musí být dostatečně spolehlivé, aby nezpůsobovaly havárie.

Byly měřeny výrobní časy jednotlivých struktur a ukázalo se, že struktury typu gyroid byly vyrobeny v kratších časech než struktury typu diamond o stejných parametrech. Výrobní časy struktur gyroid a diamond se v této studii lišily o 5 % až 12 %. [11] Výrobní čas samozřejmě roste s rostoucím objemovým poměrem, ale je také ovlivněn volbou velikosti jedné buňky. To je dáno způsobem, jakým laser pracuje. Laser nejprve nataví obrysy zpracovávaných ploch a poté je vyšrafuje. To znamená, že při volbě menších buněk laser pracuje na větším počtu kontur, což prodlužuje výrobní čas, byť objemy taveného materiálu mohou být stejné. Ideálem pro efektivní výrobu jsou tak velké buňky s malým objemem materiálu. Na druhou stranu menší buňky jsou výhodné z hlediska bezpečnosti, protože mají více kontaktních ploch se součástmi. To znamená menší zbytková pnutí díky lepšímu vedení tepla. Musí být tedy nalezen kompromis ve velikosti buňky a podílu objemu materiálu tak, aby bylo dosaženo dostatečných mechanických vlastností, výstavba byla bezpečná a zároveň dostatečně efektivní. [11]

Posledním krokem studie bylo měření odchylek převislé části. Při běžném postupu je součást nejdříve tepelně zpracována, aby byla odstraněna zbytková pnutí, a až poté jsou odstraněny podpůrné struktury. *A.Hussein a kol.* [11] ve své studii součásti po vyrobení nijak tepelně neupravovali a rovnou je zbavili podpůrných struktur. Součásti se následně deformovaly, což dokazuje, že v nich zbytkové pnutí existovalo. Vychýlení se na konci převislé části pohybovalo mezi 2,5 mm až 4 mm. Z výsledků je zřejmé, že u těch součástí, které byly podporovány strukturami s menšími buňkami a větším objemovým poměrem, byla následná deformace menší. Tyto struktury byly se součástmi spojeny ve více místech a docházelo tak k lepšímu odvodu tepla, tudíž v součásti nezůstávalo tak velké zbytkové pnutí.

C.YAN a kol. [16] studovali buňky typu gyroid. Ve své práci ukázali, že buňky tohoto typu mají vhodnou geometrii pro SLM. Díky hladkým vzpěrám a kulovitému jádru, vznikají mezi sousedními vrstvami pouze malé změny, a tak každá vrstva tvoří dostatečnou podporu pro vrstvu stavěnou na ní. Ve studii bylo ukázáno, že je možné vytvořit buňky o velikostech až 8 mm. U větších rozměrů už většinou dochází k deformacím tvaru, protože převislé části jsou už příliš velké. Byly vytvořeny buňky o objemovém poměru 15 % a velikostech 2 – 8 mm, které byly podrobeny testování v tlaku. Výsledky testování ukázaly, že buňky o menších velikostech mají lepší mechanické vlastnosti. Youngův modul pružnosti se pohyboval od 305,7 do 241,4 MPa a mez kluzu klesala ze 17 na 12,4 MPa s tím, jak se velikost buněk zvětšovala. U menších buněk laser taví větší množství menších oblastí a u malých oblastí jsou sousední dráhy laseru taveny rychleji po sobě, tudíž jejich teplota nestihne příliš klesnout. Proces v celé oblasti tak probíhá při lepších tavebních podmínkách, z čehož plyne vyšší hustota struktur doprovázena lepšími mechanickými vlastnostmi. [16]



Obr. 19 Různé velikosti buněk typu gyroid [16]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Selective laser melting je výrobní metodou, která má velký potenciál v oblasti produkce odlehčených konstrukcí, prototypů, nebo unikátních dílů, které by nebylo možné získat běžnými výrobními procesy. Nicméně je tato metoda poměrně nákladná, a proto je důležité v celém procesu 3D tisku minimalizovat plýtvání materiálem, energií i výrobním časem a snižovat tak celkovou finanční náročnost výroby. Jelikož se SLM využívá především k výrobě tvarově složitějších objektů, nezbytnou součástí většiny procesů jsou podpůrné struktury, které odvádějí z výrobku vznikající teplo a ukotvují produkt k základní desce, čímž zabráňují deformaci v důsledku prudkých teplotních změn. Cílem práce je navržení a experimentální ověření nových typů podpůrných struktur. Tyto struktury by měly mít dostatečné mechanické vlastnosti, aby zabránily deformacím vyráběných součástí, ale zároveň minimální objemy. Použití takových podpůrných struktur by mohlo šetřit prostředky při výrobě.

4. MATERIÁL A METODY

4

U podpůrných struktur je při 3D tisku požadováno, aby byly snadno a levně vyrobitelné a současně spolehlivě plnily podpůrnou funkci. U výroby součástí metodou SLM je významným faktorem, ovlivňujícím přesnost výsledného výrobku, tahové pnutí, vznikající v součásti během výstavby. Z tohoto důvodu byly navrženy nové typy podpůrných struktur, které byly vyrobeny pomocí SLM zařízení, a následně byly testovány jejich mechanické vlastnosti.

4.1 Návrh struktur

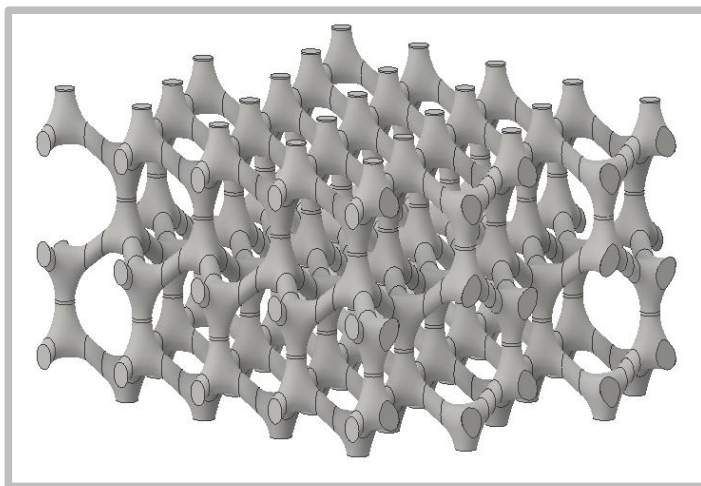
4.1

V softwaru Autodesk Inventor byl proveden návrh čtyř nových typů podpůrných struktur pro SLM. Základem všech struktur jsou jednotlivé pruty, jejichž průměry byly měněny tak, aby bylo dosaženo vzorků, které zaujímají stejné procento objemu a mohly tak být porovnávány vlastnosti struktur, u kterých je spotřebováno stejné množství materiálu na jejich výrobu. Všechny typy struktur byly vytvořeny a následně testovány ve čtyřech modifikacích, které zaujímaly 8, 10, 12 a 15 % objemu.

4.1.1 Struktura 1

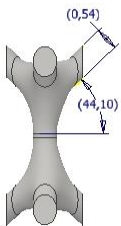
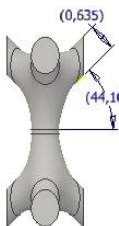
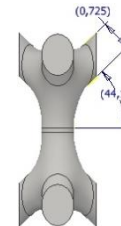
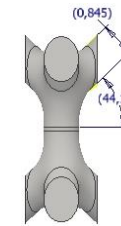
4.1.1

První struktura byla inspirována uspořádáním atomů v lonsdaleitu, což je hexagonální forma uhlíku vznikající za vyšších tlaků, než vzniká běžný diamant. [22] Základní jednotkou struktury je prut ve směru osy Z, který je na obou svých koncích propojen třemi pruty k dalším vertikálním prutům.



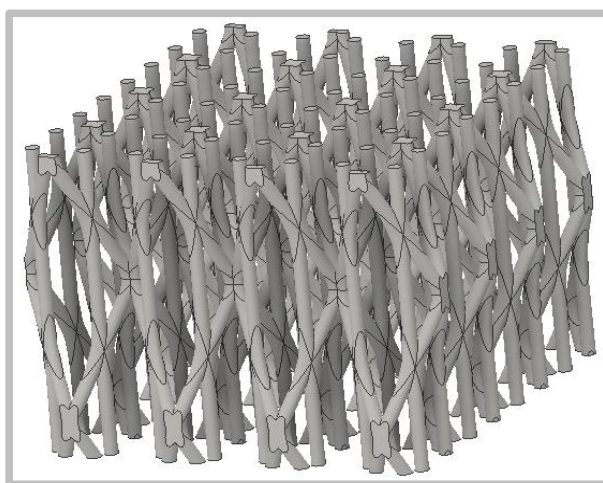
Obr. 20 Struktura 1

Tabulka 1 Parametry struktury 1

Struktura 1		8%	10%	12%	15%
velikost buňky ve směru [mm]	x	1,75	1,75	1,75	1,75
	y	1,51	1,51	1,51	1,51
	z	3,45	3,45	3,45	3,45
vzdálenost mezi spojovacími body struktury a součásti [mm]		2,960	2,865	2,775	2,655
poměr objemu materiálu v buňce [%]		7,959	9,918	11,960	14,940
nejmenší úhel ve struktuře [°]		44,1	44,1	44,1	44,1
nejmenší průměr prutu ve struktuře [mm]		0,540	0,635	0,725	0,845
					

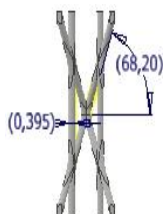
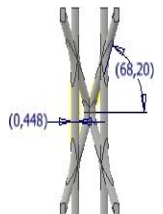
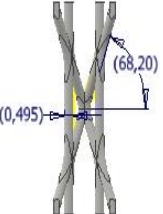
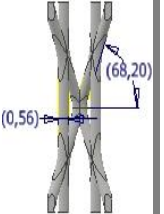
4.1.2 Struktura 2

Geometrie struktury 2 vychází z prostorově středěné (BCC) mřížky. Poměry stran jsou však upraveny a navíc jsou přidány vertikální pruty tak, aby struktura měla největší pevnost ve směru osy Z.



Obr. 21 Struktura 2

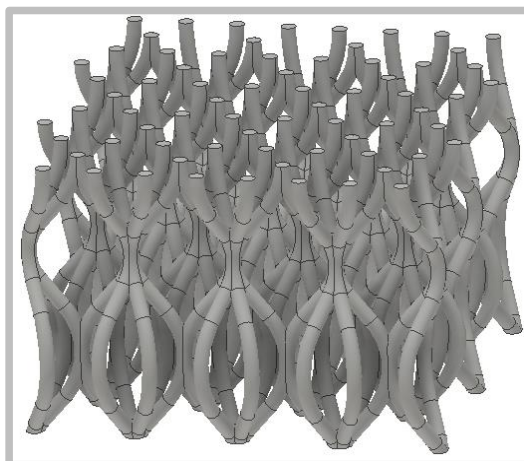
Tabulka 2 Parametry struktury2

Struktura 2		8%	10%	12%	15%
velikost buňky ve směru [mm]	x	3,5	3,5	3,5	3,5
	y	3,5	3,5	3,5	3,5
	z	8,75	8,75	8,75	8,75
vzdálenost mezi spojovacími body struktury a součásti [mm]		1,355	1,302	1,255	1,190
poměr objemu materiálu v buňce [%]		7,950	9,922	12,057	14,926
nejmenší úhel ve struktuře [°]		68,2	68,2	68,2	68,2
nejmenší průměr prutu ve struktuře [mm]		0,395	0,448	0,495	0,560
					

4.1.3 Struktura 3

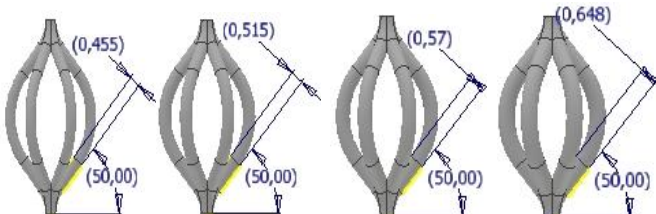
4.1.3

Struktura 3 je tvořena dvojicemi prutů ve tvaru písmene X, které jsou navzájem spojeny ve tvaru trojúhelníků. Pruty byly zvoleny zahnuté tak, aby v přechodových oblastech vznikaly co nejmenší koncentrátoři napětí.



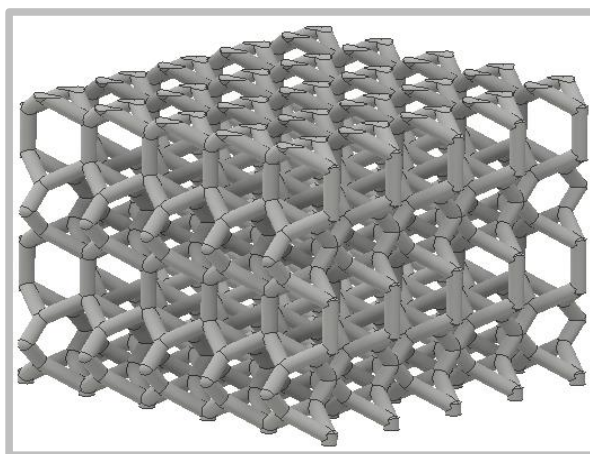
Obr. 22 Struktura 3

Tabulka 3 Parametry struktury 3

Struktura 3		8%	10%	12%	15%
velikost buňky ve směru [mm]	x	3,5	3,5	3,5	3,5
	y	3	3	3	3
	z	7,1	7,1	7,1	7,1
vzdálenost mezi spojovacími body struktury a součásti [mm]		3,045	2,985	2,930	2,852
poměr objemu materiálu v buňce [%]		7,927	9,973	11,980	15,022
nejmenší úhel ve struktuře [°]		50,0	50,0	50,0	50,0
nejmenší průměr prutu ve struktuře [mm]		0,455	0,515	0,570	0,648
					

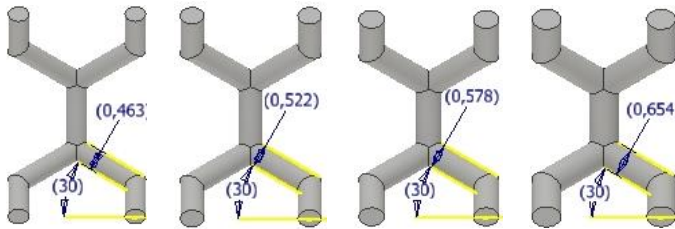
4.1.4 Struktura 4

Struktura 4 napodobňuje vnitřní uspořádání atomů v modifikaci uhlíku zvané bct-uhlík. Pruty tvoří v jednom pohledu šestiúhelníky a ty jsou spojeny pomocí dvojic prutů ve tvaru písmene X s další vrstvou šestiúhelníků.



Obr. 23 Struktura 4

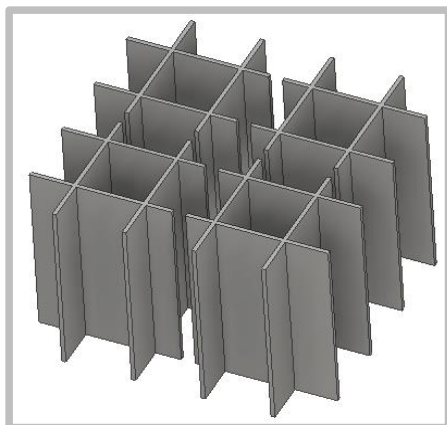
Tabulka 4 Parametry struktury 4

Struktura 4		8%	10%	12%	15%
velikost buňky ve směru [mm]	x	2,6	2,6	2,6	2,6
	y	3	3	3	3
	z	4,5	4,5	4,5	4,5
vzdálenost mezi spojovacími body struktury a součásti [mm]		2,537	2,478	2,422	2,346
poměr objemu materiálu v buňce [%]		8,019	10,002	12,042	15,032
nejmenší úhel ve struktuře [°]		30,0	30,0	30,0	30,0
nejmenší průměr prutu ve struktuře [mm]		0,463	0,522	0,578	0,654
					

4.1.5 Struktura srovnávací

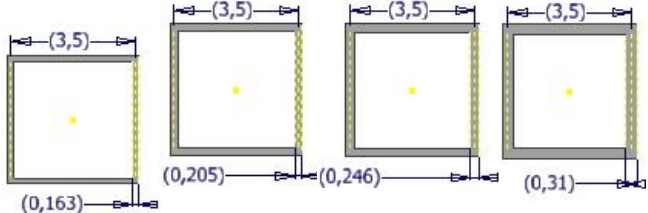
4.1.5

Srovnávací strukturu tvoří geometrie nazývaná block, jež je běžně používána pro podpurné struktury. Je tvořena skupinami navzájem kolmých stěn, které bývají pro usnadnění jejich následného odstraňování přerušeny v určitých intervalech.



Obr. 24 Struktura srovnávací

Tabulka 5 Parametry srovnávací struktury

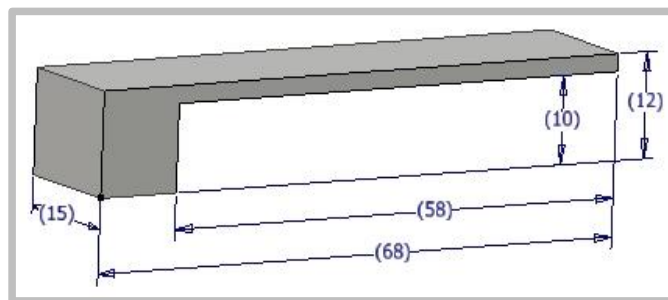
Struktura srovnávací		8%	10%	12%	15%
velikost	x	3,5	3,5	3,5	3,5
buňky ve směru [mm]	y	3,5	3,5	3,5	3,5
	z	-	-	-	-
vzdálenost mezi spojovacími body struktury a součástí [mm]		3,337	3,295	3,254	3,190
poměr objemu materiálu v buňce [%]		8,041	10,065	12,022	15,041
nejmenší úhel ve struktuře [°]		90,0	90,0	90,0	90,0
nejmenší tloušťka stěn ve struktuře [mm]		0,163	0,205	0,246	0,310
					

4.2 Testování struktur

Pro analyzování struktur bylo třeba ověřit jejich mechanické vlastnosti, výrobitelnost metodou SLM a vhodnost jejich použití jako podpůrné struktury. Proto byly navrženy dva testy.

4.2.1 Test 1

Cílem prvního testu bylo zjistit, zda je struktury vůbec možné vyrobit metodou SLM a jestli budou moci být využity jako podpory. Proto byl pro testování použit objekt s velkou převislou oblastí. Tato oblast byla podporována novými typy struktur a bylo pozorováno, zda navržené struktury budou spolehlivě plnit funkci podpor, nedojde k vychýlení převislé části a stavba tak bude úspěšně dokončena. Celkové rozměry testovacího tělesa jsou $68 \times 15 \times 12$ mm a oblast pod převislou částí, která byla vyplněna podpůrnými strukturami, má rozměry $58 \times 15 \times 10$ mm (viz obrázek 25).



Obr. 25 Testovací objekt

Všechny objekty byly vymodelovány v softwaru Autodesk Inventor a poté ve formátu STL převedeny do softwaru AutoFab, kde byl každý vzorek rozdělen na vrstvy o tloušťce 50 μm a pro každou vrstvu byla vygenerována dráha laseru. Byl také zvolen materiál – AlSi10Mg. Poté byly jednotlivé vzorky rozmístěny na výrobní platformu a byl proveden export do formátu slm, který už byl převeden přímo do SLM zařízení.

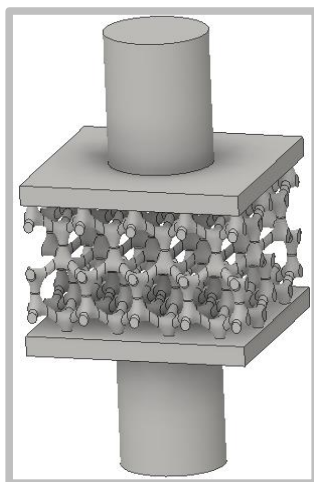
Pro tisk vzorků bylo použito zařízení SLM 280^{HL}, které disponuje stavebním prostorem 280×280×350 mm³, ve kterém je kovový prášek taven dvěma YLR-Lasery o výkonech 400 W a 1000 W. Zařízení je schopno vyrobit až 55 cm³/h a celý proces probíhá v inertní atmosféře, takže je možno vyrábět součásti i z reaktivních kovů. [23] Při experimentu byly vzorky vyrobeny z materiálu AlSi10Mg a tloušťka jedné vrstvy prášku byla 50 μm . Celý proces probíhal při teplotě 40,2 °C, přičemž základní deska byla předehřáta na 120 °C. Laser měl výkon 350 W a skenoval kontury rychlostí 500 mm/s a objem rychlostí 930 mm/s.

Po dokončení tisku byla pozorována kvalita výrobků. Pro ilustraci odchylek vyrobených vzorků od tvarů CAD modelů byl použit 3D scanner ATOS Triple Scan. Jelikož scanner není schopný naskenovat lesklý povrch, byly vzorky nejdříve opatřeny nástříkem titanovým roztokem, který jejich povrch zmatnil

4.2.2 Test 2

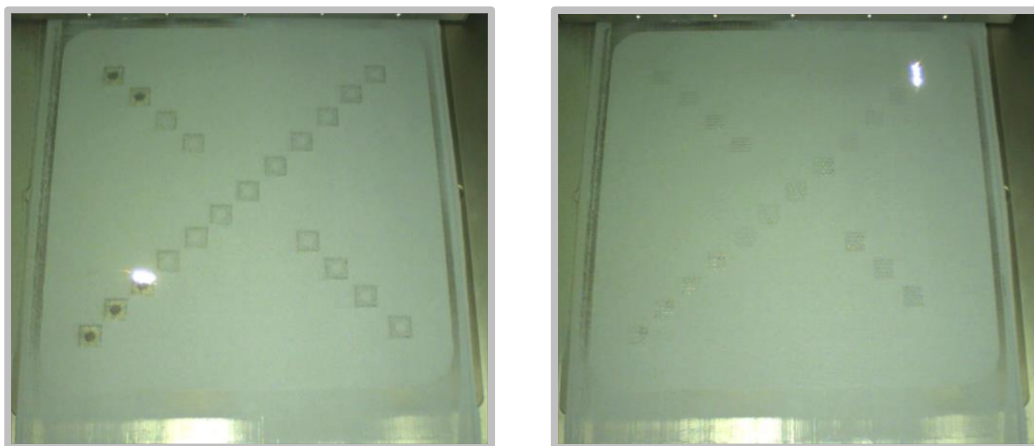
4.2.2

Druhý test byl proveden za účelem porovnání mechanických vlastností jednotlivých struktur. Byly testovány struktury o rozměrech 15×15×10 mm, které měly na dvou protilehlých stěnách vytvořeny kvádry o výšce 1,5 mm a na nich válečky o průměru 7 mm a výšce 10 mm, aby bylo možné vzorky upnout do testovacího zařízení.



Obr. 26 Struktura 1
připravena pro druhý test

Všech 20 vzorků bylo opět vymodelováno v softwaru Autodesk Inventor a vyexportováno ve formátu STL. U těchto vzorků však vznikala velká převalská oblast, která by způsobila problémy při stavbě. Také bylo požadavkem dostat nepoškozené vzorky, proto byly vzorky nejdříve posunuty o 3 mm ve směru osy Z nad platformu, aby mohly být bez újmy odřezány z platformy, a byly jim vygenerovány běžně používané blokové struktury v softwaru Materialise Magics. (S takto vygenerovanými podporami software pracuje jako se samostatným modelem a je možné zvolit různé parametry pro výrobu součásti a podpor, například při výrobě podpor laser skenuje pouze každou druhou vrstvu prášku, čímž jsou zhoršeny jejich mechanické vlastnosti a tedy usnadněno jejich následné odstraňování.) Poté byly vzorky v softwaru Autofab rozděleny na jednotlivé řezy, pro každý řez byla vygenerována dráha laseru a vzorky byly rozmístěny na výrobní platformu tak, jako tomu bylo při prvním testu. Poté byl celý objekt ve formátu slm vyexportován do zařízení SLM 280^{HL}, ve kterém byla provedena výroba vzorků.



Obr. 27 Výroba vzorků pro test 2 v SLM zařízení

Po dokončení výroby byl z platformy i struktur odstraněn přebytečný prášek, který byl uschován pro další použití. Následně byly vzorky odřezány od základní desky a zbaveny podpůrných struktur. Plochy, které byly v kontaktu s podporami, pak musely být ještě lehce obroušeny. Po dokončení příprav byly vzorky podrobeny mechanickému testování, při kterém byla zkoumána pevnost struktur v tahu. Tahová zkouška byla prováděna na přístroji Zwick Z020 při rychlosti zatěžování 1 mm/s. V přístroji byla zaznamenávána síla a kamerový systém snímal prodloužení struktur.

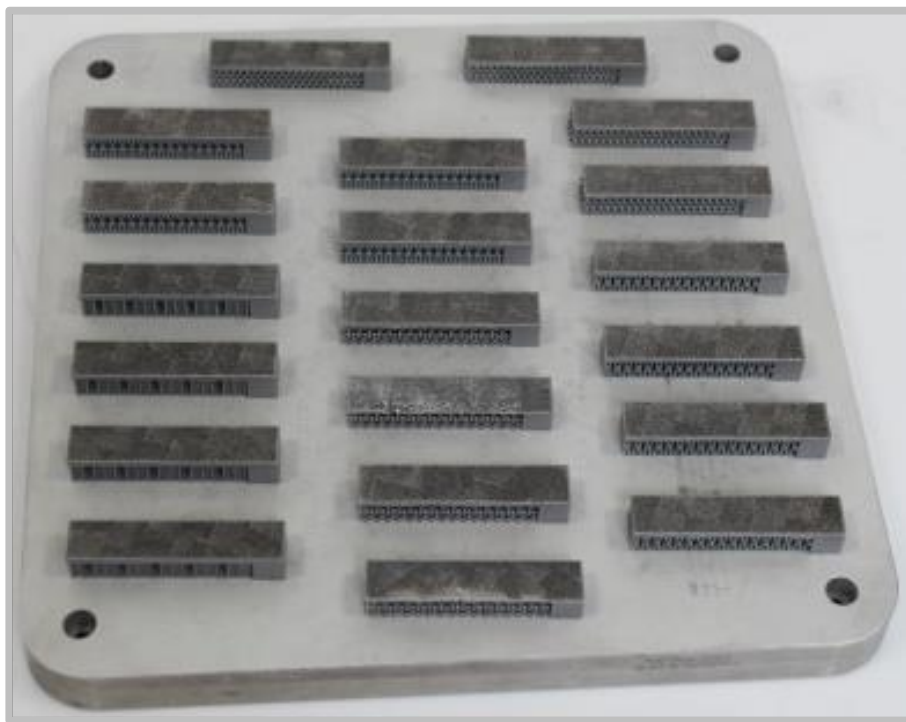


Obr. 28 Odstraňování vzorků z platformy

5. VÝSLEDKY

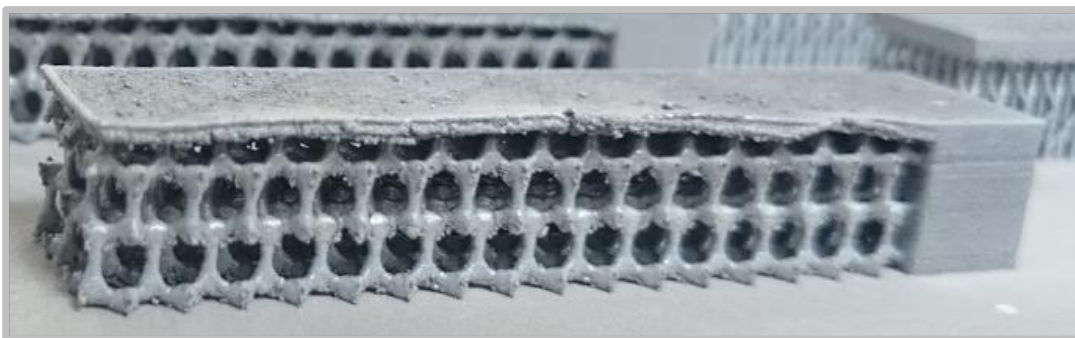
5.1 Výsledky testu 1

V prvním testu byla hodnocena vyrobiteľnosť a funkčnosť štruktúr. Během výroby bylo možné pozorovat rozdílné chování jednotlivých štruktúr a jejich odolnosť vůči pnutí, které v nich vznikalo v důsledku prudkých teplotních změn při tavení laserem a následném chladnutí. S tím, jak se měnila právě vyráběná geometrie, štruktury 1 a 4 v určitých intervalech mírně vystupovaly z prášku i poté, co byla nanášena nová vrstva a laser ještě neprovedl skenování. Nicméně tento jev vždy po čase vymizel a štruktury po nanášení nové vrstvy zase zůstávaly skryté pod práškem, proto nemusel být žádný vzorek vyřazen z procesu během výroby štruktúr. První vážnější problémy nastaly při výrobě první vrstvy plnoobjemové části na štrukturách. U štruktury 1 s objemovým podílem 12 % se tato vrstva hned po vytvoření oddělila od štruktury a deformovala se směrem vzhůru. Proto musel být tento vzorek vyřazen z procesu a jeho výroba nepokračovala. Kdyby tak nebylo učiněno, vzorek by se mohl dále deformovat a mohlo by dojít k jeho kolizi s břítem nanášecího zařízení a tím pádem by musela být zastavena celá výroba, případně by mohlo dojít k poškození zařízení. Deformace byla viditelná i u dalšího vzorku, a tak musela být z procesu vyřazena i štruktura 1 s objemovým podílem 8 %, u které byla deformace posouzena jako riziková po vytvoření 0,95 mm vysoké plnoobjemové části. U štruktury 1 vznikala na okrajích vzorků nepodepřená oblast velká až 1,67 mm, což bylo zřejmě příliš pro bezpečnou výrobu a bylo to právě místo, kde byla deformace největší. U ostatních štruktúr byla tato oblast velká nanejvýš 1,2 mm, což bylo dostatečné k tomu, aby byl zbytek vzorků dokončen bez větších komplikací.



Obr. 29 Vzorky vyrobeny pomocí SLM zařízení při prvním testu

Struktura1 s objemovým podílem 8 % musela být vyřazena z procesu výroby, avšak ještě během několika dalších vrstev výroby mohlo být pozorováno, jak se tento vzorek neustále deformuje směrem k laseru. Obrázek 30 ukazuje výslednou deformaci nedostatečně podepřeného okraje vzorku. Lze také pozorovat zhoršený povrch nejen na deformované převísle části, ale také na samotné struktuře. Tento jev byl způsoben příliš velkou koncentrací energie v oblastech, které byly zespod podporovány převážně práškem, tím pádem nedocházelo k dostatečnému odvádění tepla, zvětšovala se oblast roztaveného kovu a na tu se pak nalepoval další prášek.



Obr. 30 Deformace vzorku struktura1_8 %

Zhoršení povrchu struktury v důsledku nabalování prášku je znatelné také u struktury 4 (viz obrázek 31). Ostatní struktury byly vyrobeny bez výraznějších nedokonalostí.



Obr. 31 Zhoršený povrch u struktury 4_15 %



Obr. 32 Struktura 2

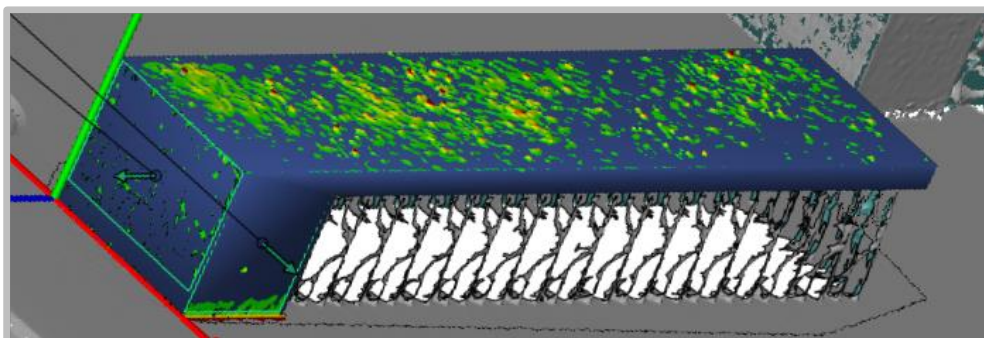


Obr. 33 Struktura 3



Obr. 34 Struktura srovnávací

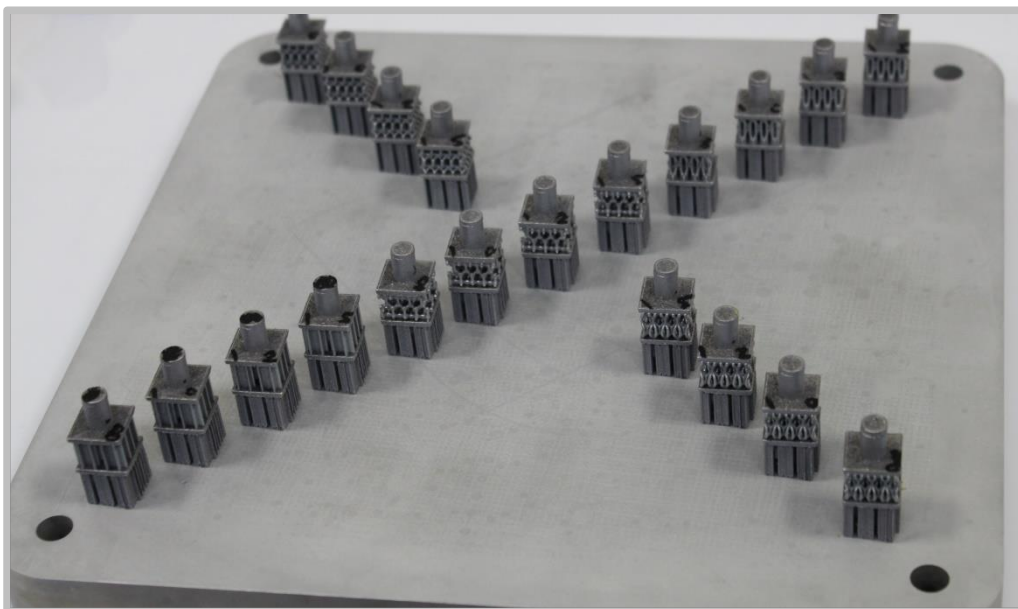
Na obrázku 24 je ukázáno porovnání vyrobené součásti a CAD modelu za pomoci 3D scanneru ATOS Triple Scan. Lze vidět, že výrobek se od tvaru modelu příliš neliší a součást nemá tendenci se v některých oblastech výrazněji deformovat.



Obr. 35 Porovnání CAD model a reálně vyrobené součásti pomocí 3D scanneru

5.2 Výsledky testu 2

Při druhém testu proběhla výroba vzorků bez komplikací, takže poté co byly odstraněny z platformy a zbaveny podpůrných struktur, byly všechny vzorky podrobeny tahové zkoušce.



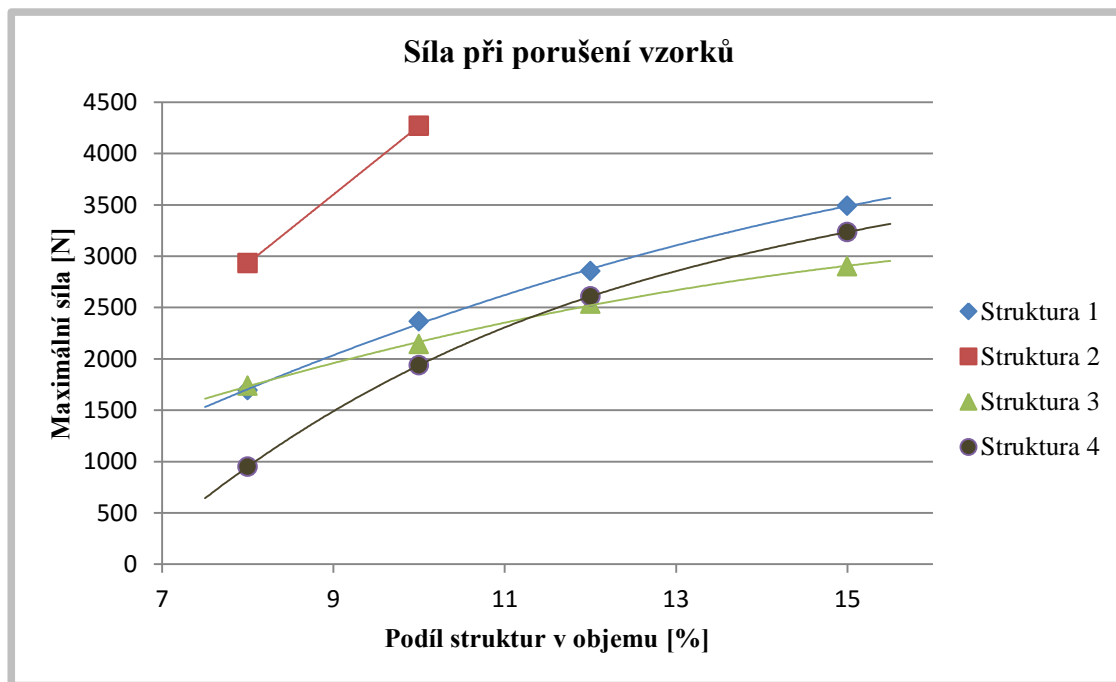
Obr. 36 Vzorky pro tahovou zkoušku vyrobené v SLM zařízení

5.2.1 Pevnost struktur

Při tahové zkoušce byla zjišťována maximální síla, kterou jsou vzorky schopny vydržet bez porušení. Bohužel při testování bylo několik vzorků porušeno mimo strukturu, a proto nebyly získány relevantní hodnoty mechanických vlastností těchto struktur. Tabulka 6 ukazuje, při jaké síle, vyvíjené testovacím strojem, se jednotlivé vzorky porušily. U vzorků, u kterých došlo k porušení mimo testovanou strukturu, jsou výsledky zapsány červeně.

Tabulka 6 Síla, při které se vzorky porušily

Podíl struktur v objemu [%]	Maximální síla [N]			
	8	10	12	15
Struktura1	1695,98	2366,74	2854,62	3492,41
Struktura2	2932,20	4269,75	4056,83	901,18
Struktura3	1739,65	2145,12	2537,45	2903,15
Struktura4	950,09	1938,09	2608,03	3235,71
Struktura srovnávací	1237,29	3037,64	3998,57	4987,67



Obr. 37 Graf závislosti pevnosti struktur na jejich objemu

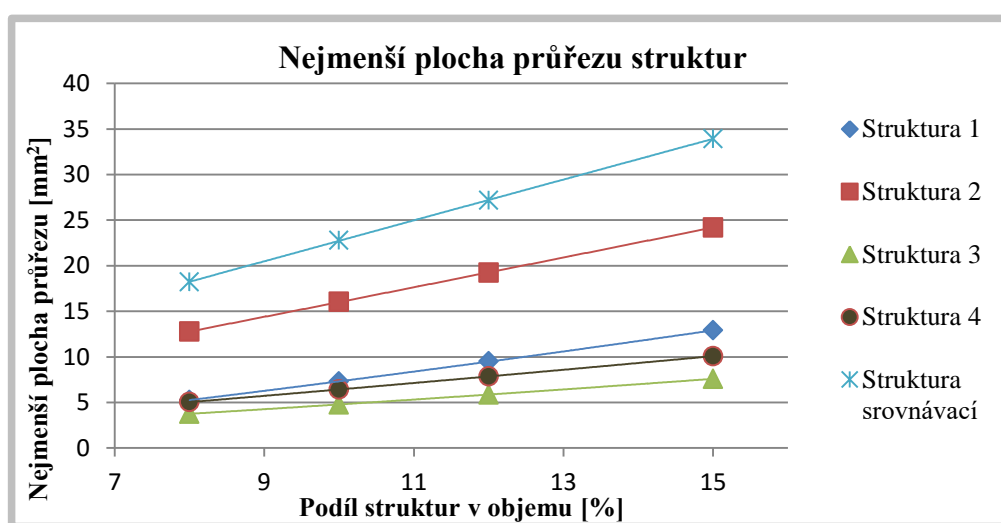
Z grafu na obrázku 37 je zřejmé, že pevnost jednotlivých struktur se zvyšuje s tím, jak se zvětšuje podíl jejich objemu v prostoru. To je výsledek poměrně očekávaný, protože se zvětšujícím se podílem se zvětšují průměry prutů ve struktuře, a tak by struktura měla být schopna přenést větší zatížení.

5.2.2 Porušení struktur

V grafu na obrázku 37 lze také pozorovat, že zatímco výsledky struktur 1, 3 a 4 byly víceméně podobné, pevnost struktury 2 byla téměř dvojnásobná. Vysvětlením může být nosný průřez struktur. Jelikož je struktura 2 navržena tak, aby byla schopná přenášet co největší zatížení ve směru osy Z, většina jejích prutů směřuje také v tomto směru, a tak se nosná plocha struktury s měnící se výškou příliš nemění. Ostatní struktury nejsou tak jednosměrně orientované, takže se při řezech strukturou v různých výškách nosná plocha mění výrazněji. Jelikož jsou zachovány stejné podíly objemu struktur v prostoru, je jasné, že nejmenší nosná plocha vyskytující se ve struktuře 2 je větší než v ostatních strukturách. Tabulka 7 ukazuje rozdíly v nosných plochách jednotlivých struktur. Na obrázku 38 jsou tyto rozdíly zaznamenány graficky a hodnoty struktury 2 převyšují hodnoty ostatních struktur podobně, jako tomu bylo v grafu sil potřebných k porušení vzorků. Graf je navíc doplněn o hodnoty struktury srovnávací. Jelikož průřez této struktury se s měnící se souřadnicí Z nemění vůbec, logicky je plocha průřezu této struktury největší a tak lze předpokládat, že pevnost této struktury v tahu by byla největší.

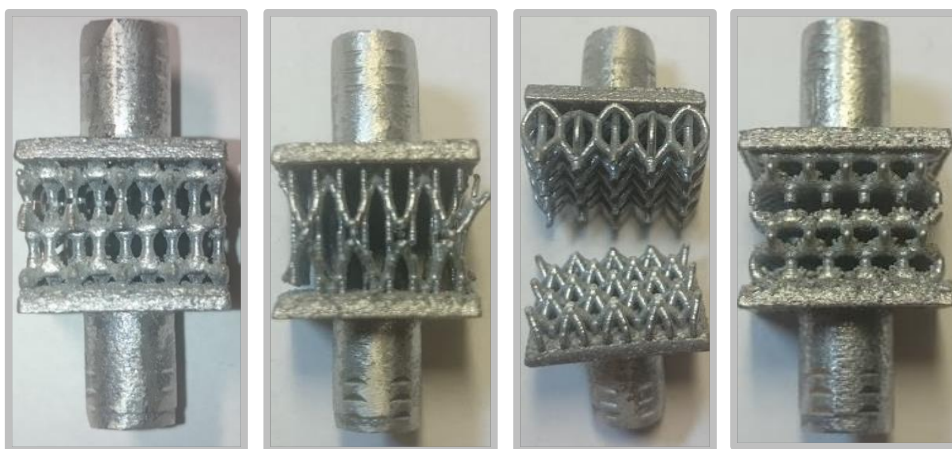
Tabulka 7 Nejmenší plochy průřezu jednotlivých struktur

Podíl struktur v objemu [%]	Nejmenší plocha průřezu [mm ²]			
	8	10	12	15
Struktura1	5,267	7,291	9,499	12,903
Struktura2	12,768	16,048	19,232	24,197
Struktura3	3,749	4,784	5,865	7,590
Struktura4	5,040	6,420	7,860	10,080
Struktura srovnávací	18,224	22,780	27,176	33,928

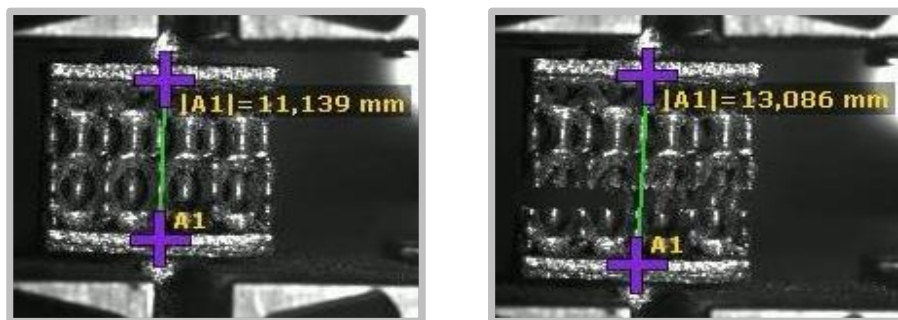


Obr. 38 Graf změny nejmenší plochy průřezu v závislosti na změně objemu

Na obrázku 39 je vidět, že vzorky se většinou opravdu porušovaly v řezech, v nichž měly nejmenší plochy a mělo by tam tak vznikat největší napětí. Ukázka porušení struktur je na obrázku 40.



Obr. 39 Porušení struktur při tahové zkoušce, zleva struktura 1, 2, 3, 4



Obr. 40 Porušení struktury 1_15 %

5.2.3 Napětí ve strukturách

Do tabulky 8 byl zaznamenán poměr síly, při které došlo k porušení vzorků, a nejmenších ploch průřezů struktur. Tím bylo získáno teoretické napětí, při kterém byly vzorky porušeny. Hodnoty u jednotlivých vzorků se poměrně významně liší. U struktury 2, která měla největší plochu průřezu je tento poměr nejmenší a naopak největší je u struktury 4, která měla nejmenší plochu průřezu. To může znamenat, že s rostoucí plochou roste taky pravděpodobnost výskytu vad ve strukturách.

Tabulka 8 Poměr síly, při které došlo k porušení vzorků, a nosného průřezu

Podíl struktur v objemu [%]	Poměr síly a nosného průřezu			
	8	10	12	15
Struktura1	322,001	324,612	300,518	270,666
Struktura2	229,652	266,061		
Struktura3	464,030	448,395	432,643	382,497
Struktura4	188,510	301,883	331,810	321,002

V tabulce 9 jsou fiktivní hodnoty napětí, jež jsou struktury schopny přenášet. Tím, že byla podělena velikost síly (při které se vzorky porušily) plochou, na níž byly vystaveny (15×15 mm), byla obdržena hodnota, která se nezabývá skutečným napětím ve struktuře, ale ukazuje vlastnost struktury jako by to byl plnoobjemový celek.

Tabulka 9 Teoretická hodnota napětí struktury.

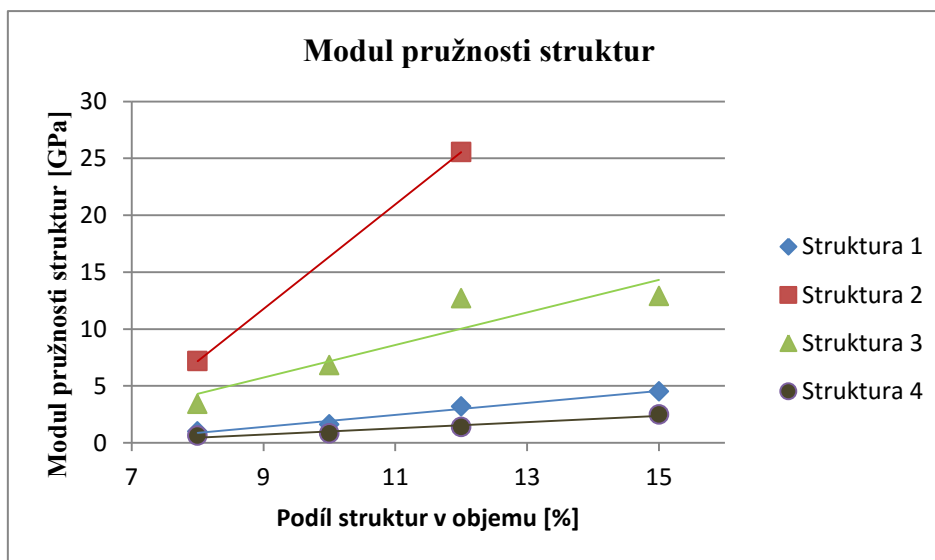
Podíl struktur v objemu [%]	Fiktivní hodnota napětí [MPa]			
	8	10	12	15
Struktura1	7,538	10,519	12,687	15,522
Struktura2	13,032	18,977		
Struktura3	7,732	9,534	11,278	12,903
Struktura4	4,223	8,614	11,591	14,381

5.2.4 Tuhost struktur

Záznam síly z přístroje Zwick Z020 byl použit pro výpočet napětí, podobně jako tomu bylo v tabulce 9, tedy zatěžovací síla byla podělena celou plochou vzorku 15×15 mm. Toto napětí poté bylo vyděleno hodnotou relativního prodloužení struktury, získanou pomocí kamerového systému, čímž byla získána hodnota charakterizující tuhost struktury, která může být nazvána modul pružnosti struktur. Hodnoty těchto modulů jednotlivých struktur jsou zaznamenány v tabulce 10. V grafu na obrázku 41 je zobrazena závislost těchto hodnot na podílu struktury v objemu. Lze vidět, že tuhosti se zvětšují přibližně lineárně se zvětšujícím se objemem. Zatímco u struktur 1 a 4 je průběh křivek podobný, tuhost struktury 3 je násobně větší a s rostoucím objemem se zvětšuje výrazněji. Nejstrmější křivka je pak dosažena u struktury 2, u které však proběhlo správné vyhodnocení pouze dvou vzorků. Záznamy tahových zkoušek jsou v příloze 1.

Tabulka 10 Modul pružnosti struktur

Podíl struktur v objemu [%]	Modul pružnosti struktur [GPa]			
	8	10	12	15
Struktura 1	0,993	1,613	3,181	4,529
Struktura 2	7,181		25,548	
Struktura 3	3,427	6,818	12,713	12,899
Struktura 4	0,639	0,836	1,401	2,479



Obr. 41 Závislost modulu pružnosti struktur na jejich objemovém podílu

6. DISKUZE

Při prvním testu byla prováděna kontrola výrobitelnosti a funkčnosti navržených druhů podpůrných struktur. Dva vzorky struktury 1 musely být během výroby v SLM zařízení vyřazeny z procesu, protože část objektu nad těmito strukturami se začala nebezpečně deformovat. Pnutí v součásti bylo způsobeno prudkým zahřátím materiálu poté, co byla oblast skenována laserem, a následným rychlým chladnutím. Jelikož u vzorků se strukturou 1 byly spojovací body podpor a součásti příliš daleko od okraje součásti, nedocházelo k dostatečnému odvádění tepla z vyráběné oblasti a podpůrné struktury také nemohly dostatečně eliminovat vznikající deformaci vzorku. U ostatních vzorků se nevyskytovaly tak velké nepodepřené oblasti, proto byly vzorky úspěšně dokončeny bez výrazných deformací. U některých vzorků však bylo možné pozorovat zhoršenou kvalitu povrchu v převislých oblastech, protože odvod tepla nebyl dokonalý a v důsledku nadměrné koncentrace energie docházelo k nabalování okolních zrněk prášku na součást. Analýza odchylek pomocí 3D skeneru ukázala, že tvarové odchylky převíslé části výrobku od CAD modelu byly podobné jako odchylky části, která byla zespod podporována plným materiálem. Je tedy zřejmé, že vyrobené struktury dostatečně ukotvovaly součást k základní desce.

V druhém testu byly všechny vzorky vyrobeny bez problémů a byla testována jejich pevnost v tahu. Bohužel šest vzorků bylo při zatěžování porušeno mimo testovanou strukturu. U třech z nich pak došlo k jejich porušení při zátěžných silách, které bez problému překonala řada jiných vzorků. To mohlo být způsobeno vnitřním defektem dílu na rozhraní struktury a horní destičky, nebo také neopatrnou manipulací a drobným poškozením vzorku při odstraňování podpůrných struktur, které pak mohlo působit jako koncentrátor napětí a iniciátor lomu. Z úspěšně otestovaných vzorků byly jasně nejlepší mechanické vlastnosti struktury 2. To je zřejmě způsobeno tím, že tato struktura má většinu svých prutů orientovaných ve směru zatěžování a může tak dobře přenášet zatížení v tomto směru. K porušení vzorků docházelo v průřezu struktury, ve kterém má nejmenší plochu a bylo ukázáno, že síla nutná k porušení vzorků se zvětšovala s velikostí této plochy. Z toho důvodu se dá předpokládat, že pokud by byla srovnávací struktura správně otestována, prokázala by největší pevnost, protože má ve všech řezech kolmých na směr zatěžování stejnou nosnou plochu a tedy největší ze všech struktur. Nicméně úspora materiálu je u této struktury pouze relativní, protože spousta prášku zůstává zachycena uvnitř struktury. Hlavním benefitem navržených struktur je, že všechny přebytečný prášek může být odstraněn ihned po dokončení výroby a uschován pro další použití.

Při zjišťování tuhostí struktur dosáhla podle očekávání největších hodnot opět struktura 2. Výrazně větší tuhosti než ostatní vzorky vykazovala také struktura 3 i přesto, že její pevnost byla podobná jako pevnost struktur 1 a 4. To může být přisouzeno tomu, že byt' je hodnota nejmenšího nosného průřezu blízká hodnotám struktur 1 a 4, je většina prutů ve struktuře orientována ve směru zatížení a struktura tak může dobře odolávat zatížení v tomto směru.

7. ZÁVĚR

7

V práci byly navrženy čtyři nové typy podpůrných struktur za účelem nalezení vhodné geometrie, která by měla dostatečnou pevnost pro fixaci dílu a současně malý objem. Navržené struktury byly použity jako podpory pro velkou přepislou oblast testovacího objektu. Ukázalo se, že důležitým faktorem ovlivňujícím kvalitu finálního výrobku je vzdálenost bodů, ve kterých je součást připojena k strukturám. U struktury 1 byly tyto body příliš vzdáleny od okraje součásti, proto se součást začala deformovat a výroba některých vzorků musela být zastavena, aby nedošlo ke kolizi vzorků se zařízením. Během výroby ostatních struktur se problémy nevyskytly. Pomocí 3D scanneru bylo ověřeno, že odchylky vyrobených součástí od CAD modelu nebyly příliš velké a byly podobné v převislé i plnoobjemové části.

Ve druhém testu byly porovnány pevnosti jednotlivých struktur v tahu. Zatímco výsledky struktur 1, 3 a 4 byly podobné, struktura 2 vykazovala téměř dvojnásobné hodnoty pevností. To ukazuje, že výsledná pevnost struktury v tahu závisí především na jejím nejmenším nosném průřezu, protože hodnoty nejmenších nosných průřezů struktury 2 byly také násobně větší než u ostatních navržených typů. Při zjišťování tuhostí dosahovala největších hodnot opět struktura 2, nicméně hodnoty struktury 3 byly také výrazně vyšší, než tomu bylo u zbylých dvou. Z toho bylo usouzeno, že tuhost závisí především na orientaci prutů uvnitř struktury.

8. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] CALIGNANO, F. Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting. *Materials* [online]. 2014, **64**, 203-213 [cit. 2016-03-13]. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.07.043. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306914005755>
- [2] YAN, Chunze, Liang HAO, Ahmed HUSSEIN, Philippe YOUNG a David RAYMONT. Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting. *Materials* [online]. 2014, **55**, 533-541 [cit. 2016-03-20]. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.10.027. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306913009540>
- [3] BREMEN, Sebastian, Wilhelm MEINERS a Andrei DIATLOV. Selective Laser Melting. *Laser Technik Journal* [online]. 2012, **9**(2), 33-38 [cit. 2016-03-13]. DOI: 10.1002/latj.201290018. ISSN 16137728. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/latj.201290018>
- [4] HiETA Technologies [online]. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <http://www.hieta.biz/wp-content/uploads/2012/07/Metal-Additive-Manufacturing.jpg>
- [5] CARTER, Luke N., Christopher MARTIN, Philip J. WITHERS a Moataz M. ATTALLAH. *The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy* [online]. [cit. 2016-05-01]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.06.172. ISBN 10.1016/j.jallcom.2014.06.172. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092583881401528X>
- [6] WANG, Di, Yongqiang YANG, Ruicheng LIU, Dongming XIAO a Jianfeng SUN. Study on the designing rules and processability of porous structure based on selective laser melting (SLM). *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2013, **213**(10), 1734-1742 [cit. 2016-04-05]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.05.001. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013613001490>
- [7] STRANO, G., L. HAO, R. M. EVERSON a K. E. EVANS. A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2013, **66**(9-12), 1247-1254 [cit. 2016-03-13]. DOI: 10.1007/s00170-012-4403-x. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-012-4403-x>
- [8] 3D Printing Systems [online]. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <http://3dprintingsystems.com/wp-content/uploads/2011/10/hip.gif>

- [9] SU, Xubin, Yongqiang YANG, Di WANG a Yonghua CHEN. Digital assembly and direct fabrication of mechanism based on selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2013, **19**(3), 166-172 [cit. 2016-03-20]. DOI: 10.1108/13552541311312157. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/13552541311312157>
- [10] LI, C., et al. A Temperature-Thread Multiscale Modeling Approach for Efficient Prediction of Part Distortion by Selective Laser Melting. In: *Conference: The 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, At Austin, TX*. Dostupné z: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2015/2015-95-Li.pdf>
- [11] HUSSEIN, Ahmed, Liang HAO, Chunze YAN, Richard EVERSON a Philippe YOUNG. Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2013, **213**(7), 1019-1026 [cit. 2016-03-13]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.01.020. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092401361300037X>
- [12] WANG, Tian-Ming, Jun-Tong XI a Ye JIN. *A model research for prototype warp deformation in the FDM process* [online]. [cit. 2016-05-21]. DOI: 10.1007/s00170-006-0556-9. ISBN 10.1007/s00170-006-0556-9. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-006-0556-9>
- [13] VORA, Pratik, Kamran MUMTAZ, Iain TODD a Neil HOPKINSON. AlSi12 in-situ alloy formation and residual stress reduction using anchorless selective laser melting. *Additive Manufacturing* [online]. 2015, **7**, 12-19 [cit. 2016-03-15]. DOI: 10.1016/j.addma.2015.06.003. ISSN 22148604. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860415000305>
- [14] THOMAS, Daniel. *The Development of Design Rules for Selective Laser Melting 2009*. Cardiff: University of Wales Institute. Dostupné z: <https://repository.cardiffmet.ac.uk/dspace/handle/10369/913>
- [15] KRUTH, Jean-Pierre, Peter MERCELIS, Jonas VAN VAERENBERGH a Tom CRAEGHS. In: *Feedback control of selective laser melting* [online]. 0070n. 1. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/185342/1/krufcs.pdf>
- [16] YAN, Chunze, Liang HAO, Ahmed HUSSEIN a David RAYMONT. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2012, **62**, 32-38 [cit. 2016-03-13]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.06.002. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695512001095>

- [17] YAN, Chunze, Liang HAO, Ahmed HUSSEIN, Simon Lawrence BUBB, Philippe YOUNG a David RAYMONT. Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2014, **214**(4), 856-864 [cit. 2016-04-05]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.12.004. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013613003804>
- [18] CLOOTS, M.; SPIERINGS, A. B.; WEGENER, K. Assessing new support minimizing strategies for the additive manufacturing technology SLM. In: *24th International SFF Symposium-An Additive Manufacturing Conference, Austin, USA, University of Texas at Austin*. 2013. p. 631-643. Dostupné z: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2013/2013-50-Cloots.pdf>
- [19] POHL, Haiko, et al. Thermal stresses in direct metal laser sintering. In: *Proceedings of the 12th Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX*. 2001. Dostupné z: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2001/2001-41-Pohl.pdf>
- [20] JHABVALA, Jamasp, Eric BOILLAT, Cédric ANDRÉ a Rémy GLARDON. An innovative method to build support structures with a pulsed laser in the selective laser melting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2012, **59**(1-4), 137-142 [cit. 2016-03-13]. DOI: 10.1007/s00170-011-3470-8. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-011-3470-8>
- [21] DI WANG, YONGQIANG YANG, MANHUI ZHANG, JIANBIN LU, RUICHENG LIU a DONGMING XIAO. Study on SLM fabrication of precision metal parts with overhanging structures. *2013 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)* [online]. IEEE, 2013, 222-225 [cit. 2016-04-05]. DOI: 10.1109/ISAM.2013.6643532. ISBN 978-1-4799-1657-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6643532>
- [22] KRAUS, D., A. RAVASIO, M. GAUTHIER, et al. *Nanosecond formation of diamond and lonsdaleite by shock compression of graphite* [online]. [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1038/ncomms10970. ISBN 10.1038/ncomms10970. Dostupné z: <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/ncomms10970>
- [23] Laser Beam Melting System SLM 280 HL. SLM SOLUTIONS GMBH. *SLM Solutions GmbH* [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://stage.slmsolutions.com/download.php?f=61008aff89ca6259285ee7f35052f942>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

3D	trojrozměrný
BCC	Body Centred Cubic
CAD	Computer Aided Design
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
SLM	Selective Laser Melting
STEP	STandard for the Exchange of Product model data
STL	Stereolithography
YLR	Ytterbium laser

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 Princip SLM [4]	11
Obr. 2 Proces SLM [3]	12
Obr. 3 Kyčelní implantát vyroben pomocí SLM [8]	12
Obr. 4 Univerzální spoj vyroben pomocí SLM [9]	13
Obr. 5 Vznik deformace [12]	14
Obr. 6 Vychylování součásti při různých teplotách předehřevu [3]	14
Obr. 7 Staircase effect [1]	15
Obr. 8 Zhoršení rozměrové přesnosti převalené části [1]	16
Obr. 9 Princip nalepování zrn na tavenou oblast [16]	16
Obr. 10 Struktura po vyrobení (vlevo) a po tepelném zpracování (vpravo) [17]	17
Obr. 11 Různé orientace součásti při výrobě [7]	18
Obr. 12 Vyrobené vzorky s různými úhly sklonu stěn [6]	19
Obr. 13 Součásti vyrobeny s různými parametry laseru [15]	20
Obr. 14 Převalá součást vyrobená různými rychlostmi laseru [21]	20
Obr. 15 Běžně používané druhy podpůrných struktur [1]	21
Obr. 16 Připojení podpůrných struktur k součásti pomocí zubů [1]	22
Obr. 17 Struktura Schwarz diamond (vlevo) a Schoen gyroid (vpravo) [16;17]	22
Obr. 18 Součást pro testování buněčných struktur [11]	23
Obr. 19 Různé velikosti buněk typu gyroid [16]	25
Obr. 20 Struktura 1	27
Obr. 21 Struktura 2	28
Obr. 22 Struktura 3	29
Obr. 23 Struktura 4	30
Obr. 24 Struktura srovnávací	31
Obr. 25 Testovací objekt	33
Obr. 26 Struktura 1 připravena pro druhý test	34
Obr. 27 Výroba vzorků pro test 2 v SLM zařízení	34
Obr. 28 Odstraňování vzorků z platformy	35
Obr. 29 Vzorky vyrobeny pomocí SLM zařízení při prvním testu	36
Obr. 30 Deformace vzorku struktura 1_8 %	37
Obr. 31 Zhoršený povrch u struktury 4_15 %	37
Obr. 32 Struktura 2	37
Obr. 33 Struktura 3	38
Obr. 34 Struktura srovnávací	38
Obr. 35 Porovnání CAD model a reálně vyrobené součásti pomocí 3D scanneru	38
Obr. 36 Vzorky pro tahovou zkoušku vyrobené v SLM zařízení	39
Obr. 37 Graf závislosti pevnosti struktur na jejich objemu	40
Obr. 38 Graf změny nejmenší plochy průřezu v závislosti na změně objemu	41
Obr. 39 Porušení struktur při tahové zkoušce, zleva struktura 1, 2,3,4	41
Obr. 40 Porušení struktury 1_15 %	42
Obr. 41 Závislost modulu pružnosti struktur na jejich objemovém podílu	43

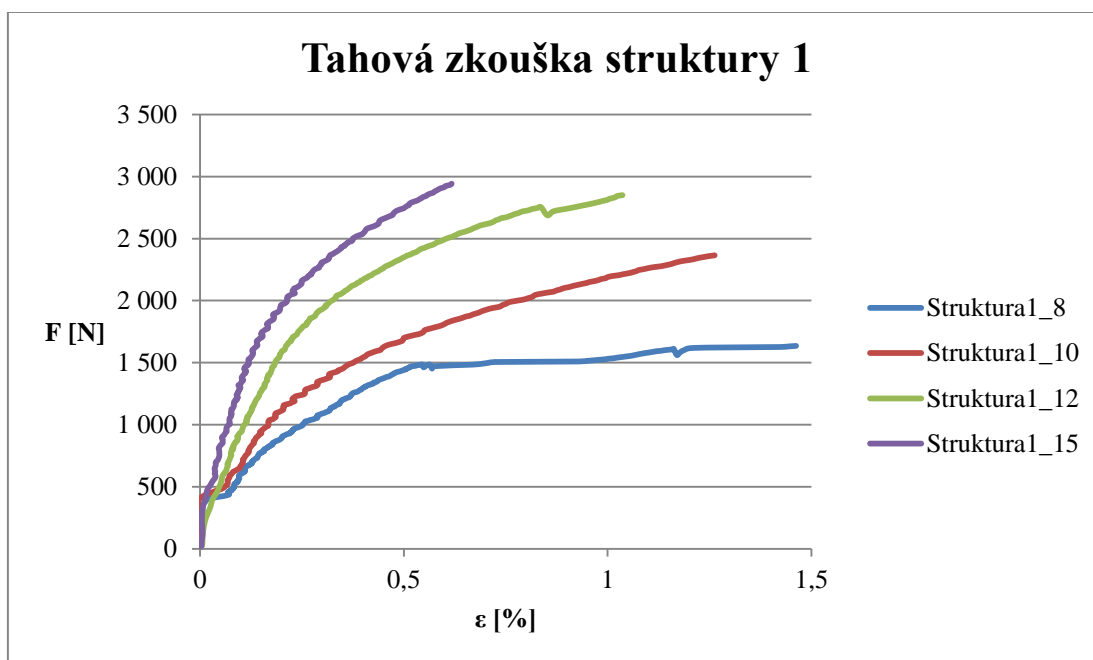
SEZNAM TABULEK

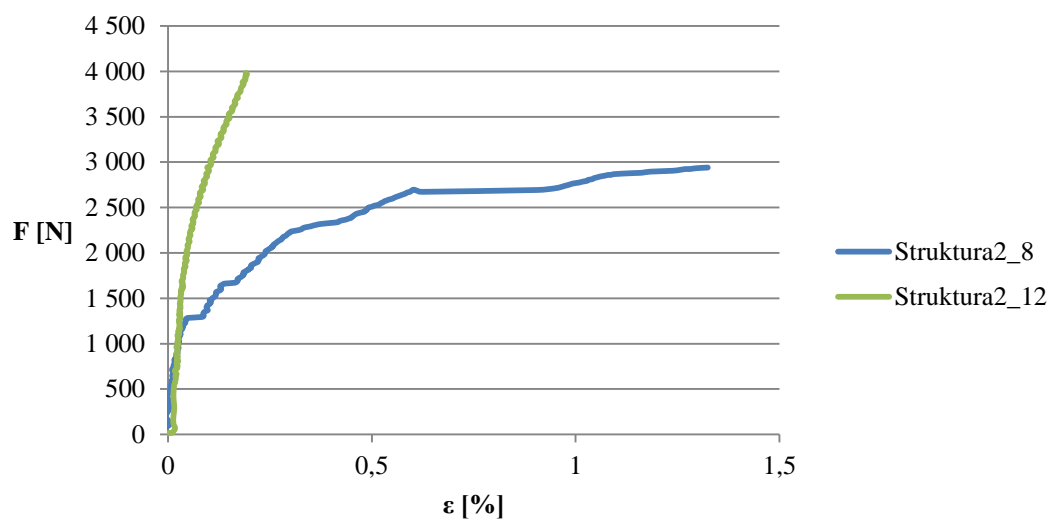
Tabulka 1 Parametry struktury 1	28
Tabulka 2 Parametry struktury2	29
Tabulka 3 Parametry struktury 3	30
Tabulka 4 Parametry struktury 4	31
Tabulka 5 Parametry srovnávací struktury	32
Tabulka 6 Síla, při které se vzorky porušily	39
Tabulka 7 Nejmenší plochy průřezu jednotlivých struktur	41
Tabulka 8 Poměr síly, při které došlo k porušení vzorků, a nosného průřezu	42
Tabulka 9 Teoretická hodnota napětí struktury.	42
Tabulka 10 Modul pružnosti struktur	43

PŘÍLOHA 1

LABORATORNÍ PROTOKOL

Název zkoušky	Tahová statická zkouška
Zkušební stroj	Zwick z020
Rychlost zatěžování	1 mm/s
Celkové rozměry testovaných vzorků	15×15×33 mm
Datum zkoušky	12. 5. 2016
Teplota	21 °C



Tahová zkouška struktury 2**Tahová zkouška struktury 3**